



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Alexandre Mosimann Silveira

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE CORTE
EM SOLO RESIDUAL DE GRANITO DE COCAL DO SUL/SC**

Florianópolis/SC

2024

Alexandre Mosimann Silveira

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE CORTE
EM SOLO RESIDUAL DE GRANITO DE COCAL DO SUL/SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa Gracieli Dienstmann, Dra.

Florianópolis/SC

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Silveira, Alexandre Mosimann

Análise probabilística da estabilidade de um talude de corte em solo residual de granito de Cocal do Sul/SC / Alexandre Mosimann Silveira ; orientador, Gracieli Diestmann, 2024.

117 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Estabilidade de taludes. 3. Variabilidade geotécnica. 4. Análise probabilística. I. Diestmann, Gracieli. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Alexandre Mosimann Silveira

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DE CORTE EM
SOLO RESIDUAL DE GRANITO DE COCAL DO SUL/SC**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado em 09/08/2024
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Helena Paula Nierwinski, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr.
Universidade Federal de Santa Maria

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Profa. Fernanda Fernandes Marchiori, Dra.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação

Profa. Gracieli Dienstmann, Dra.
Orientadora

Florianópolis/SC, 2024

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Rosita, pelo seu rigor de sempre na minha educação, por ser minha base e meu apoio.

Ao meu pai Ivo (in memoriam), minha referência como pessoa, como engenheiro e como professor, que colocou no meu sangue essas duas paixões profissionais.

Às minhas filhas Amanda e Isabela, maiores presentes da vida, motivações para todas as minhas conquistas.

À Engenheira, Professora e Orientadora Gracieli, por aceitar e confiar neste meu desafio, me conduzir neste caminho e por todos os seus ensinamentos.

À empresa Nova Engevix Engenharia e Projetos S/A, me incentivando e flexibilizando para que eu pudesse concluir esta etapa profissional.

À empresa Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda., onde comecei, aprendi e trabalhei por 22 anos, além de ter disponibilizado o projeto de engenharia, base deste estudo.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela excelência de sempre no ensino, oportunizando a minha formação de Engenheiro Civil e agora Mestre.

À Deus, pela força e pela saúde, permitindo realizar mais um sonho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Análises probabilísticas aplicadas a taludes de corte e encostas naturais são essenciais para gestão de risco, e para projetos e manutenção de rodovias. No entanto, muitas das aplicações encontradas em literatura carecem de dados de campo e de laboratório apropriados, definindo de forma puramente teórica o conjunto e amplitude de parâmetros considerados nas análises. Neste sentido, o presente trabalho apresenta a caracterização estatística dos parâmetros de resistência de um solo residual de granito, no km 362,4 do projeto de engenharia para aumento de capacidade da rodovia SC-108, no município de Cocal do Sul/SC, elaborado pelo Governo do Estado de Santa Catarina. Para a definição da variabilidade dos parâmetros de resistência do solo local foram coletadas quarenta (40) amostras indeformadas a partir de uma distribuição espacial em uma região concentrada de dimensões de 1,15 x 1,15 m e realizados ensaios de caracterização e resistência ao cisalhamento. A distribuição dos moldes seguiu uma distribuição espacial e agrupamento a cada quatro (4) corpos de prova, permitindo a definição de dez (10) envoltórias de resistência. Foram ainda realizados testes de normalidade, que indicaram aderência às funções normal, para representação da distribuição dos parâmetros de atrito e peso específico natural do material. A distribuição lognormal mostrou-se mais apropriada para representação da coesão. Com base neste conjunto de resultados, foi realizada análise probabilística de um talude de corte da região, para três inclinações distintas: 1(V):1(H), 1(V):1,5(H) e 1(V):2(H), utilizando método de equilíbrio limite e análise de Monte Carlo e distribuição aleatória de parâmetros, através do Software Plaxis LE. Como resultado foi caracterizado um fator de segurança determinístico de 1,174 (Fellenius), com probabilidade de falha de até 5,8% para o talude 1(V):1(H). O trabalho também apresenta uma análise de sensibilidade onde foram avaliados os impactos da variação da inclinação do talude, do coeficiente de variação dos parâmetros e das distâncias de correlação.

Palavras-chave: equilíbrio limite; Monte Carlo; função densidade de probabilidade.

ABSTRACT

The variability of the results of geotechnical parameters associated with soil shear strength, and consequent stability analyses, has been published in international literature and it is intended, with this dissertation, to contribute to this theme for engineering. Probabilistic analyzes applied to cut slopes and natural slopes are essential for risk management, and for highway designs and maintenance. However, many of the applications found in the literature lack adequate field and laboratory data, defining in a purely theoretical way the set and range of parameters considered in the analyses. In this sense, the present work presents the statistical characterization of the resistance parameters of a granite residual soil, at km 362.4 of the engineering project to increase the capacity of the SC-108 highway, in the municipality of Cocal do Sul/SC. To define the variability of local soil resistance parameters, forty (40) undisturbed samples were collected from a spatial distribution in a concentrated region measuring 1.15 x 1.15 m and characterization and shear resistance tests were carried out. The distribution of the molds followed a spatial distribution and grouping every four (4) specimens, allowing the definition of ten (10) resistance envelopes. Normality tests were also carried out, which indicated adherence to normal functions, to represent the distribution of the friction parameter and natural specific weight of the material. The lognormal distribution proved to be more appropriate for representing cohesion. Based on this set of results, a probabilistic analysis was carried out on a cut slope in the region, for three different slopes: 1(V):1(H), 1(V):1,5(H) and 1(V):2(H), using the limit equilibrium method and Monte Carlo analysis and random distribution of parameters, through the Plaxis LE software. As a result, a deterministic safety factor of 1.174 (Fellenius) was characterized, with a probability of failure of up to 5.8% for the slope 1(V):1(H). The work also presents a sensitivity analysis where the impacts of varying the slope, the coefficient of variation of the parameters and the correlation distances were evaluated.

Key-words: limit equilibrium; Monte Carlo; Probability Density Function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo proposto.....	6
Figura 2 – Distribuição normal.....	9
Figura 3 – Distribuição lognormal.....	9
Figura 4 – Distância média de interseção para o cálculo da escala de flutuação	13
Figura 5 – Exemplo de gráfico de autocorrelação	14
Figura 6 – Função Densidade de Probabilidade	16
Figura 7 – Probabilidades admissíveis de ruptura.....	17
Figura 8 – Fluxograma para aplicação do Método de Monte Carlo.....	19
Figura 9 – Campos aleatórios.	22
Figura 10 – Mapa geológico do sul do Estado de SC	26
Figura 11 – Geologia da região de Cocal do Sul.....	27
Figura 12 – Mapa de localização.....	28
Figura 13 – Região de estudo	28
Figura 14 – Perfil longitudinal.....	29
Figura 15 – Seção transversal de terraplenagem.....	29
Figura 16 – Seção gabaritada de terraplenagem	30
Figura 17 – Classificação dos materiais - HRB	33
Figura 18 – Diagrama de trabalho.....	35
Figura 19 – Classificação SUCS dos materiais finos.....	37
Figura 20 – Curva granulométrica – km 362,4	38
Figura 21 – Imagem da sondagem em execução	40
Figura 22 – Imagem da caixa de testemunho	40
Figura 23 – Perfil de sondagem mista.....	41
Figura 24 – Esquema da coleta das amostras indeformadas para ensaio de cisalhamento direto	42
Figura 25 – Posicionamento dos moldes.....	43
Figura 26 – Moldagem das amostras	43
Figura 27 – Posicionamento das 40 amostras coletadas	44
Figura 28 – Coleta do bloco indeformado.....	47
Figura 29 – Ensaio de cisalhamento complementar 01.....	48
Figura 30 – Pesagem da amostra	49
Figura 31 – Caixa bipartida	50

Figura 32 – Gráficos do 5º conjunto: Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal, Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal.....	51
Figura 33 – Envoltória de cisalhamento – amostras da região 5.....	52
Figura 34 – Envoltórias de cisalhamento obtidas considerando os 10 conjuntos de CPs avaliados.....	53
Figura 35 – Coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo de pico para o conjunto de amostras.....	54
Figura 36 – Gráficos normalizados do conjunto 5: (a) 30kPa (b) 50kPa.....	55
Figura 37 – Gráficos normalizados do conjunto 5: (c) 70 kPa (d) 100 kPa.....	55
Figura 38 – Mapa de variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico.....	57
Figura 39 – Mapa de variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio.....	58
Figura 40 – Alinhamento 1: variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio.....	60
Figura 41 – Alinhamento 2: variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio.....	60
Figura 42 – Alinhamento 2: variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio.....	61
Figura 43 – Ângulo de atrito de pico: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	63
Figura 44 – Coesão de pico: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	63
Figura 45 – Ângulo de atrito último: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	64
Figura 46 – Coesão última: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	64
Figura 47 – Ângulo de atrito mínimo: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	65
Figura 48 – Coesão mínima: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	65
Figura 49 – Ângulo de atrito secante: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	66
Figura 50 – Peso específico: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot.....	66
Figura 51 – Campo aleatório gerado pelo Plaxis LE.....	70
Figura 52 – Seção modelada – talude 1:1.....	71
Figura 53 – Seção modelada – talude 1:1,5.....	71
Figura 54 – Seção modelada – talude 1:2.....	72
Figura 55 – Simulação S32 – inclinação 1(V):1(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating).....	78

Figura 56 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating).....	79
Figura 57 – Probabilidade de falha para ângulo de atrito: (a) COV 5%; (b) COV 15%	80
Figura 58 – Probabilidade de falha para coesão: (a) COV 20%; (b) COV 50.....	81
Figura 59 – Probabilidade de falha para peso específico: (a) COV 3%; (b) COV 7%	81
Figura 60 – Simulação S32 – inclinação 1(V):1,5(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating).....	84
Figura 61 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating).....	85
Figura 62 – Simulação S32 – inclinação 1(V):2(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating).....	88
Figura 63 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating).....	89
Figura 64 – Probabilidade de falha: talude 1(V):1(H) com escalas de flutuação de bibliografia.....	94
Figura 65 – Probabilidade de falha: talude 1(V):1(H) com escalas de flutuação calculadas	95
Figura 66 – Simulação S3 – inclinação 1(V):1(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating).....	96
Figura 67 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating).....	97
Figura 68 – Ensaio de cisalhamento complementar 2.....	105
Figura 69 – Ensaio de cisalhamento complementar 3.....	105
Figura 70 – Ensaio de cisalhamento complementar 4.....	106
Figura 71 – Ensaio de cisalhamento complementar 5.....	106
Figura 72 – Ensaio de cisalhamento complementar 6.....	107
Figura 73 – Cisalhamento Direto – Amostra 1.....	108
Figura 74 – Cisalhamento Direto – Amostra 2.....	109
Figura 75 – Cisalhamento Direto – Amostra 3.....	110
Figura 76 – Cisalhamento Direto – Amostra 4.....	111
Figura 77 – Cisalhamento Direto – Amostra 5.....	112
Figura 78 – Cisalhamento Direto – Amostra 6.....	113

Figura 79 – Cisalhamento Direto – Amostra 7.....	114
Figura 80 – Cisalhamento Direto – Amostra 8.....	115
Figura 81 – Cisalhamento Direto – Amostra 9.....	116
Figura 82 – Cisalhamento Direto – Amostra 10.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalos de coeficientes de variação de propriedades geotécnicas.....	7
Tabela 2 – Valores de literatura para escalas de flutuação.....	12
Tabela 3 – Modelos de autocorrelação	15
Tabela 4 – Probabilidades de falha aceitáveis para estabilidade de taludes.....	17
Tabela 5 – Modelos de autocorrelação	20
Tabela 6- Referências de estudos.....	23
Tabela 7- Tipologia e localização dos solos.....	25
Tabela 8 – Resumo dos ensaios	32
Tabela 9 – Caracterização e classificação do material	37
Tabela 10 – Valores padrão por norma.....	46
Tabela 11 – Resumo dos cálculos para definição da velocidade	49
Tabela 12 – Resumo da resistência ao cisalhamento	51
Tabela 13 – Resumo dos resultados	53
Tabela 14 – Resultados do ângulo de atrito efetivo – secante do pico	56
Tabela 15 – Resumo dos resultados	59
Tabela 16 – Resumo das escalas de flutuação	61
Tabela 17 – resultados dos testes de hipótese	62
Tabela 18 – Resumo dos resultados	72
Tabela 19 – Talude 1(V):1(H).....	76
Tabela 20 – Talude 1(V):1,5(H).....	82
Tabela 21 – Talude 1(V):2(H).....	86
Tabela 22 – Resumo dos resultados	90
Tabela 23 – Resumo dos resultados	90
Tabela 24 – Comparação entre os fatores de segurança.....	91
Tabela 25 – Talude 1:1.....	95
Tabela 26 – Talude 1(V):1,5(H).....	98
Tabela 27 – Talude 1(V):2(H).....	98
Tabela 28 – Probabilidades de falha para cada simulação	99

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

μ	Média
σ	Desvio padrão
Θ	Escala de flutuação ou comprimento de correlação
\bar{d}	Média das distâncias entre pontos consecutivos de interseção da curva correspondente à variação real de uma dada propriedade com a respectiva curva de regressão
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado
q_c	Resistência de ponta
q_t	Resistência real mobilizada
$\xi(x)$	Parâmetro geotécnico a ser modelado
$t(x)$	Componente de tendência
$w(x)$	Componente de flutuação ou ruído
H_0	Adensamento primário
COV	Coefficiente de variação
t	Média da tendência da propriedade do solo
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
C'	Coesão efetiva
γ	Peso específico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo geral	3
1.2	Objetivos Específicos	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	Variabilidade Geotécnica	4
2.1.1	Modelando a variabilidade geotécnica	5
2.1.2	Coeficiente de variação.....	6
2.1.3	Função densidade de probabilidade (FDP).....	8
2.1.4	Escala de flutuação.....	11
2.2	Método de equilíbrio limite e probabilidade de falha	15
2.2.1	Método de Monte Carlo.....	18
2.2.2	Soluções utilizando campo homogêneo sem variação espacial	21
2.2.3	Soluções utilizando campo aleatório.....	21
3	ESTUDO DE CASO	24
3.1	Elementos do projeto de engenharia	24
3.2	Materiais e métodos	33
4	INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA – INTERPRETAÇÃO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS E DE VARIABILIDADE	36
4.1	Sondagem a trado e ensaios de caracterização	36
4.2	Sondagem mista	39
4.3	Amostras para ensaios de cisalhamento direto e análise da variabilidade	41
4.3.1	Preparação dos corpos de prova	44
4.3.2	Fase de consolidação e determinação da velocidade de ensaio	45
4.4	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e interpretação de parâmetros estatísticos básicos	50
4.4.1	Escala de flutuação.....	59
4.4.2	Análise de aderência a função densidade de probabilidade	61
5	APLICAÇÃO NUMÉRICA: ANÁLISE DE ESTABILIDADE E PROBABILIDADE DE FALHA	67
5.1	Software utilizado	67
5.1.1	Visão geral	67

5.1.2	Análise probabilística	68
5.2	Definição da geometria de referência e parâmetros determinísticos..	70
5.2.1	Fator de segurança determinístico.....	72
5.3	Análise da variabilidade espacial considerando a seção de referência	73
5.3.1	Dados considerados na análise	73
5.3.2	Resultados de probabilidade de falha e fator de segurança	74
5.4	Análise de probabilidade considerando o Método de Monte Carlo e campo homogêneo	89
5.5	Comparação entre o fator de segurança determinístico e o fator de segurança médio.....	91
5.6	Seção estudo de caso – talude de corte do km 362,4 da rodovia estadual SC-108	93
5.7	Considerações sobre a probabilidade de falha.....	98
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
6.1	Conclusões.....	100
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	101
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
	APÊNDICE A	105
	ANEXO A	108

1 INTRODUÇÃO

Não existe obra de engenharia de qualidade sem que a geotecnia tenha a sua importância enaltecida. O estudo do comportamento dos solos e das rochas é de fundamental importância para a garantia do sucesso de um bom projeto e, conseqüentemente, de uma boa execução. Para tanto, este comportamento deve ser analisado quanto às tensões e deformações levando em conta as diferentes características de cada empreendimento. Fundamental neste contexto é a definição de parâmetros de projeto adequados, e se possível de sua variabilidade e representatividade.

A definição de parâmetros geotécnicos é um dos grandes desafios do engenheiro geotécnico. A coleta dos materiais, moldagens, transporte, acondicionamento e a execução de ensaios de campo e de laboratório, procedimentos estes definidos por normas, requerem atenção especial pois interferem no resultado final. Obras de engenharia, em especial de infraestrutura, geralmente são executadas em larga escala, e a definição de apenas um coeficiente pontual para ser aplicado em conceitos, fórmulas e modelos pode não ter a representatividade necessária para todo o contexto que se pretende analisar.

A heterogeneidade dos materiais geotécnicos, que configura a variabilidade da composição, resulta na variabilidade de propriedades geotécnicas dos solos formados. Elkateb *et al.* (2002) citam que as ferramentas convencionais para lidar com a heterogeneidade do solo no campo da engenharia geotécnica têm sido aplicadas sob o uso de fatores de segurança e implementando a experiência local e o julgamento da engenharia. Essa posição de projeto costuma resultar, muitas vezes, em um superdimensionamento das estruturas, de acordo com o que também destaca Baecher e Christian (2003). De fato, reconhece-se que o fator de segurança não é uma medida consistente de risco, uma vez que encostas com o mesmo valor de fator de segurança podem apresentar diferentes níveis de risco, dependendo da variabilidade das propriedades do solo (Li e Lumb, 1987).

A utilização de abordagens probabilísticas aplicadas a encostas vem ganhando espaço nesse cenário introduzindo ferramentas para lidar com as incertezas das propriedades do solo de maneira sistemática, com destaque para os trabalhos

clássicos de Alonso, (1976); Vanmarcke, (1977b); Li e Lumb, (1987); Christian *et al.*, (1994); Griffiths e Fenton, (2004). Mais recentemente destacam-se os trabalhos de Branco *et al.* (2014), Bong and Song (2018), Abdulai *et al.* (2021), Zhang *et al.*, (2022), Viviescas *et al.* (2022), Jiang *et al.* (2022), Wu *et al.* (2024) com aplicações específicas voltadas a caracterização da variabilidade e a incorporação desta em perfis de solos distintos. No entanto, em se tratando de solos residuais a caracterização de parâmetros probabilísticos adequados ainda é incipiente e muitas aplicações recorrem a faixas de variação teóricas, o que pode não reproduzir uma resposta realista dos casos avaliados.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva caracterizar a variabilidade natural de um solo residual de granito proveniente da região de Cocal do Sul/SC, através de uma campanha de ensaios estruturada para que sejam obtidos índices físicos, como coesão, ângulo de atrito e peso específico, com representatividade estatística. Com base nos resultados obtidos foram realizadas análises de estabilidade visando identificar fator de segurança e a quantificação da probabilidade de falha.

1.1 Objetivo geral

Quantificar a variabilidade dos parâmetros de resistência de um solo residual de granito, e realizar análises estatística de probabilidade de falha de um trecho de corte local.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Realizar análise estatística, cálculo de média, desvio padrão, coeficiente de variação e função densidade de probabilidade, para estabelecer parâmetros característicos (índices físicos e parâmetros de resistência) de um solo residual de granito;
- Caracterizar a variabilidade espacial através da determinação de escalas de flutuação horizontais;
- Realizar análise de estabilidade determinística e probabilística para uma seção de corte realizada no solo local, visando identificar o impacto da variabilidade sobre os critérios de segurança estabelecidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado um referencial teórico acerca dos principais tópicos que norteiam o entendimento da presente dissertação. São apresentados aspectos relacionados a variabilidade geotécnica, fontes de incerteza, e índices estatísticos para caracterização da variabilidade do material. Por fim, são apresentados conceitos básicos referentes a aplicação da variabilidade para análises probabilísticas aplicadas a taludes.

2.1 Variabilidade Geotécnica

As propriedades dos materiais geotécnicos variam espacialmente, sendo denominado de variabilidade espacial inerente (Uzielli *et al.*, 2006) ou de variabilidade natural (Phoon e Retief, 2016).

Os solos e suas propriedades são afetados por diversos fatores durante seus processos de formação, como processos de intemperismo e erosão, agentes de transporte e condições de sedimentação (Cao *et al.*, 2017). Estudando os solos de Hong Kong, El-Ramly *et al.* (2002) concluem que os solos residuais formados pela decomposição de granito e rochas vulcânicas, e que variações na mineralogia e no tamanho de grão da rocha mãe e nos processos de intemperismo químico, desintegração física, alteração hidrotermal e lixiviação resultam em solos heterogêneos. Essa heterogeneidade é uma importante fonte de incerteza na estimativa da resistência ao cisalhamento operacional e na identificação de potenciais superfícies de deslizamento e mecanismos de ruptura em taludes.

A classificação de Phoon e Kulhawy (1999) separa as fontes de incerteza em relação aos processos de formação, chamada de variabilidade inerente – definida por processos geológicos (intemperismo) que continuamente transformam rochas e solos *in situ*; variabilidade advinda da investigação - neste item enquadram-se tanto os erros/dispersões oriundos de equipamentos não calibrados e erros de execução, bem como a representatividade da amostra coletada; e variabilidade do modelo de transformação – fonte de incerteza introduzida quando as medidas de ensaios de campo e ou de laboratório são transformados em parâmetros de projeto.

Baecher e Christian (2003) complementam a caracterização de Phoon e Kulhawy (1999) apresentando também três categorias de incertezas descritas como:

- **variabilidade natural do material**, que seria a aleatoriedade inerente do processo natural: um fenômeno que varia com o tempo e com o espaço.
- **incerteza no conhecimento**, subdividida em três categorias: i) a incerteza na escolha do modelo matemático adequado à realidade e a incerteza do parâmetro, que envolve a precisão do parâmetro estimado. Esta resulta da imprecisão na avaliação dos valores dos parâmetros dos dados de ensaio ou calibração e é restringida por um número limitado de observações; ii) a incerteza na caracterização do local, resultante de erros de ensaio e da representatividade inadequada das amostras, por exemplo; e iii) a incerteza no parâmetro está relacionada com a precisão com que os parâmetros do modelo podem ser estimados. Resulta da imprecisão na avaliação dos valores a partir de dados de ensaios ou calibração e é acentuada pelo número limitado de observações.
- **incerteza no modelo de decisão**, que são incertezas operacionais, incluindo as associadas à construção, à fabricação, à deterioração, à manutenção e a fatores humanos.

A variabilidade inerente pode ser discretizada através da representação espacial de campos aleatórios também descrita por Phoon e Kulhawy (1999) e estruturada nos conceitos de Vanmarcke (1983). Neste contexto, a variabilidade de um parâmetro pode ser descrita por uma componente determinística (tendência do parâmetro, geralmente dependente da profundidade); e uma flutuação (ruído ou resíduo da tendência).

Para analisar a variabilidade inerente busca-se uma caracterização geotécnica mais afinada, incorporando índices quantitativos, como o coeficiente de variação e a escala de flutuação (Phoon e Kulhawy, 1999), explanados na sequência.

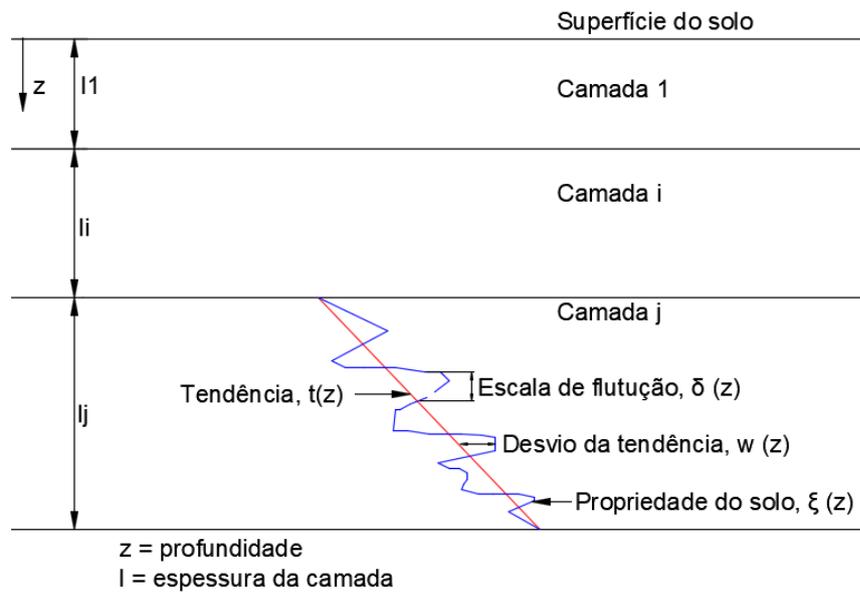
2.1.1 Modelando a variabilidade geotécnica

Para modelar o campo aleatório de uma propriedade do solo, considera-se que a variabilidade do mesmo possui dois componentes: um componente de tendência determinístico (muitas vezes dependente da profundidade) e um componente de flutuação (Phoon *et al.*, 1999), conforme Equação 1.

$$\xi(x) = t(x) + w(x) \quad (1)$$

Onde, $\xi(x)$ é o parâmetro geotécnico a ser modelado, $t(x)$ é o componente de tendência e $w(x)$ é o componente de flutuação ou ruído. A Figura 1 apresenta a visualização do modelo proposto, da variabilidade de uma propriedade de solo ao longo da profundidade.

Figura 1 – Modelo proposto



Fonte: adaptado de Phoon (1999)

O termo flutuação $w(x)$ pode ser associado a propriedades estatísticas como média (μ), desvio padrão (σ) e escala de flutuação ou comprimento de correlação (Θ), como será abordado na sequência do trabalho.

2.1.2 Coeficiente de variação

Uzielli *et al.* (2006) afirmam que as estatísticas de segundo momento (ou seja, média e desvio padrão) sozinhas não são capazes de descrever a variação espacial das propriedades do solo, sejam medidas em laboratório ou *in situ*. Dois conjuntos de medições podem ter estatísticas de segundo momento e distribuições estatísticas semelhantes, mas podem exibir diferenças substanciais na distribuição espacial.

Para Phoon e Ching (2015), o grau de dispersão de uma variável é mais facilmente percebida quando expressa pelo coeficiente de variação, adimensional,

que é a relação entre o desvio padrão (σ) e a média (μ), demonstrada na Equação 2 abaixo.

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} * 100 (\%) \quad (2)$$

Na Tabela 1 apresenta-se um compilado de valores de COV disponíveis em literatura visando apresentar uma visão geral da variação esperada para parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) e peso específico do solo. De acordo com a tabela apresentada, observa-se que o peso específico apresenta, na média, os menores intervalos de COV, com um máximo de 20%. A coesão é o parâmetro que apresenta os maiores intervalos de variação, com até 186%. Já para o ângulo de atrito os resultados são medianos, se comparados com os outros dois parâmetros, com um pico de 56%.

Tabela 1 – Intervalos de coeficientes de variação de propriedades geotécnicas

Tipo de material	Propriedade	Referência	COV (%)
Areia	ângulo de atrito	Phoon e Kulhawy (1995)	5 a 11
Argila e silte	ângulo de atrito	Phoon e Kulhawy (1995)	10 a 50
Argila	ângulo de atrito	Beacher e Christian (2003)	12 a 56
Argila	ângulo de atrito	White <i>et al.</i> (2005)	20 a 48
Argila	ângulo de atrito	Campello <i>et al.</i> (2019)	8 a 16
Argila - coluviar	ângulo de atrito	Sousa (2020)	9,2
Argila - residual	ângulo de atrito	Sousa (2020)	8
Silte arenoso	ângulo de atrito	Riselo <i>et al.</i> (2021)	16,2
Argila	coesão	Guedes (1997)	8 a 14
Argila	coesão	White <i>et al.</i> (2005)	22 a 186
Areia e argila	coesão	Forrest e Orr (2010)	20 a 40
Areia e argila	coesão	Shahin e Cheung (2011)	10 a 70
Argila	coesão	Campello <i>et al.</i> (2019)	35 a 66
Argila - coluviar	coesão	Sousa (2020)	40,1
Argila - residual	coesão	Sousa (2020)	51,4
Silte arenoso	coesão	Riselo <i>et al.</i> (2021)	34,2
Grão fino	peso específico	Phoon e Kulhawy (1995)	3 a 20
Argila	peso específico	White <i>et al.</i> (2005)	8 a 11
Argila	peso específico	Campello <i>et al.</i> (2019)	3 a 5

Tipo de material	Propriedade	Referência	COV (%)
Argila - coluviar	peso específico	Sousa (2020)	2,6
Argila - residual	peso específico	Sousa (2020)	3,5

2.1.3 Função densidade de probabilidade (FDP)

Uma distribuição de probabilidades é uma função que estabelece a probabilidade de ocorrência de um valor x dentro de uma função x . No caso de variáveis discretas, isso pode ser descrito conforme apresentado na Equação 3:

$$P [x] = f(x) \quad (3)$$

Onde P é a probabilidade e a função $f(x)$ é denominada função de densidade de probabilidades. Fenômenos naturais apresentam comportamentos probabilísticos com algum grau de semelhança, o que torna possível a sua representação através de distribuições teóricas. De acordo com Fenton e Griffiths (2018), nas práticas de engenharia, as distribuições contínuas de probabilidade mais comuns são: Exponencial, Gamma, Uniforme, Weibull, Rayleigh, Normal e Lognormal. No presente trabalho foram utilizadas as distribuições Normal e Lognormal, sendo descritas a seguir.

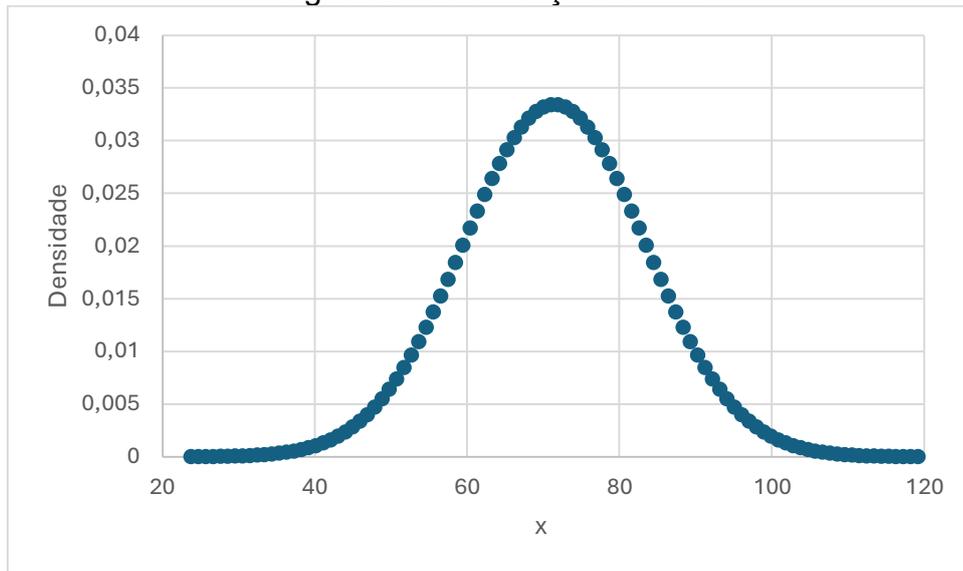
2.1.3.1 Distribuição normal

Também conhecida como distribuição de Gauss este modelo de distribuição é o mais conhecido e também o mais utilizado. Para a elaboração da Equação são utilizados média e desvio padrão, sendo a média o centro da distribuição e o desvio padrão o espalhamento da curva, conforme Equação 4 a seguir.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

A Figura 2 a seguir apresenta a configuração de uma distribuição normal.

Figura 2 – Distribuição normal



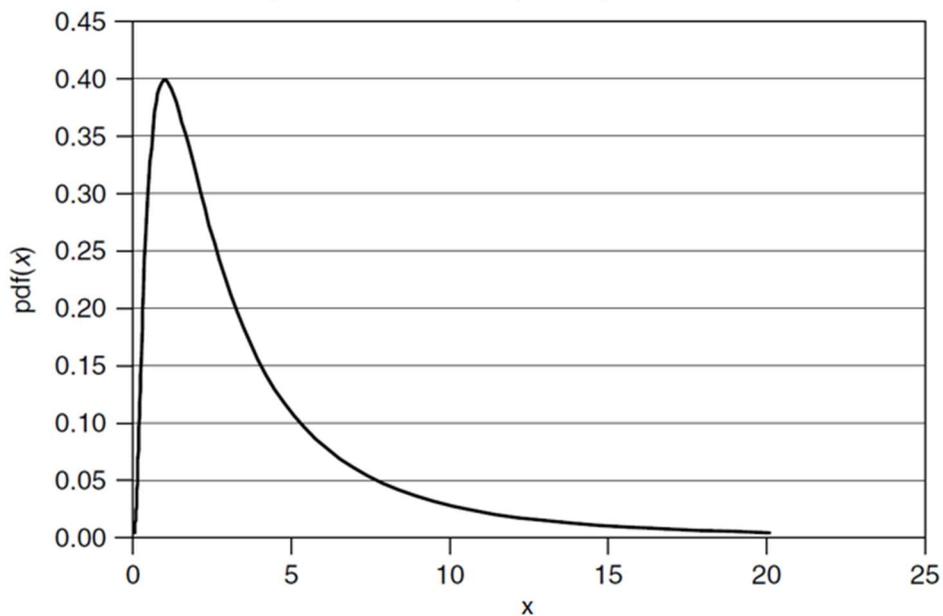
2.1.3.2 Distribuição lognormal

Neste tipo de distribuição o logaritmo de uma variável aleatória possui a forma de distribuição normal, demonstrada na Equação 5.

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln(x)-\mu^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

A Figura 3 apresenta a configuração de uma distribuição lognormal.

Figura 3 – Distribuição lognormal



Fonte: Baecher e Christian (2003)

2.1.3.3 Testes de normalidade

A análise de aderência à FDP pode ser realizada através do comparativo direto entre histogramas dos dados reais e funções teóricas. Adicionalmente, diferentes testes teóricos de normalidade podem ser utilizados para aceitar ou rejeitar a hipótese de que os dados podem ser representados por uma distribuição normal.

De acordo com Ghasemi e Zahediasl (2012) os testes de normalidade são complementares à avaliação gráfica da normalidade, comparando as pontuações nas amostras a um conjunto de pontuações normalmente distribuídas com a mesma média e desvio padrão.

As hipóteses dos testes, de forma geral, são:

- H_0 : a diferença entre frequências observadas e esperadas é pequena ou $F_0(X) - S_n(X) \approx 0$. Não há evidências para rejeitar a hipótese de que a distribuição normal representa os dados.
- H_1 : Caso Contrário. Não há evidências para aceitar a hipótese de que a distribuição normal representa os dados.

Para decisão sobre as hipóteses é necessário escolher um nível de significância, geralmente sendo adotados: α de 0,05 (representando 95%) ou 0,01 (representando 99%).

Os testes calculam um valor estatístico de acordo com as equações propostas por cada método e retornam o chamado *p-valor*. Este é utilizado para a análise das hipóteses sobre a normalidade dos dados, seguindo a seguinte lógica:

- Quando $p\text{-valor} > \alpha$: a hipótese H_0 não pode ser rejeitada - não há evidências para Rejeitar H_0 ;
- Quando $p\text{-valor} < \alpha$: a hipótese H_0 pode ser rejeitada - há evidências para Rejeitar H_0 .

Para o presente trabalho foram adotados os testes de normalidade de Shapiro Wilk e de Anderson-Darling.

O primeiro foi publicado em 1965 por Samuel Sanford Shapiro e Martin Wilk e utiliza a regressão dos valores amostrais ordenados com as correspondentes estatísticas de seis ordens normais, conforme demonstrado na Equação 6:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (6)$$

O segundo compara a função de distribuição acumulada empírica de seus dados amostrais com a distribuição esperada, através da Equação 7:

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{(2i - 1)x \log_e[F(x)] + [2(n - 1) + 1]x \log_e[1 - F(x)]\} \quad (7)$$

2.1.4 Escala de flutuação

A escala de flutuação, ou distância de correlação, de uma determinada propriedade é uma medida de distância dentro da qual os pontos do maciço apresentam valores da mesma ordem de grandeza, relativos à tendência da curva de regressão, indicando a existência de uma correlação entre as propriedades de pontos adjacentes (Wickremesinghe e Campanella, 1993).

De forma geral a escala de flutuação pode ser utilizada de maneira direta para estabelecer a correlação entre parâmetros ao longo de um perfil, ou seja, se o valor da escala de flutuação for baixo, as propriedades dos pontos adjacentes não devem apresentar correlação, enquanto que se o valor da escala de flutuação for elevado, as oscilações em torno da curva de regressão são pouco frequentes e, conseqüentemente, deve existir uma forte interdependência entre as propriedades de pontos que se encontram relativamente afastados entre si.

Em virtude do processo de formação dos solos as escalas de flutuação horizontal tendem, em regra, a assumir valores que chegam a ordens de grandeza superiores aos das escalas de flutuação vertical (Phoon e Kulhawy, 1999), entretanto em solos residuais as escalas podem assumir a mesma ordem de grandeza

A Tabela 2 apresenta um compilado de valores de escala de flutuação encontrados em literatura. Analisando-se os resultados apresentados, constata-se que as escalas horizontais tendem a ser superiores às escalas verticais. Enquanto que a primeira apresenta resultados de até 80 m, na segunda os valores não chegam a 5 m. Phoon e Kulhawy (1999) citam que esta conclusão não é surpreendente porque as propriedades do solo tendem a ser mais variáveis na direção vertical do que na direção horizontal.

Tabela 2 – Valores de literatura para escalas de flutuação

Tipo de material	Referência	Ensaio utilizado	Aplicação - software utilizado	Escala horizontal	Número de ensaios para escala horizontal	Escala vertical	Número de ensaios para escala vertical
Areia, argila	Phoon et al. (1995)	CPT	-	3 - 80 m	11	0,1 - 2,2 m	7
Solo residual de granito	Branco (2014)	Cisalhamento direto	Análise probabilística de estabilidade - Slide	0,29 - 0,42 m	40	-	-
Rejeitos de mineração de ouro	Perini (2021)	CPTu	Análise da variabilidade - Abaqus	-	-	0,14 - 2,23 m	11
Solo residual	Viviescas et al. (2021)	SPT	-	20,2 - 22,73	146	0,74 - 1,32	146
Fluxo de lama	Viviescas et al. (2021)	SPT	-	5,21 - 10,3 m	132	1,1 - 1,56 m	132
Argila	Huang et al. (2022)	CPT	-	-	-	0,24 - 1,01 m	16
Argila	Huang et al. (2022)	SPT	-	-	-	0,96 - 3,99 m	15
Solo sedimentar argiloso	Ziesmann (2023)	CPTu	Análise probabilística de estabilidade - RFEM e	-	-	0,34 - 4,22 m	1

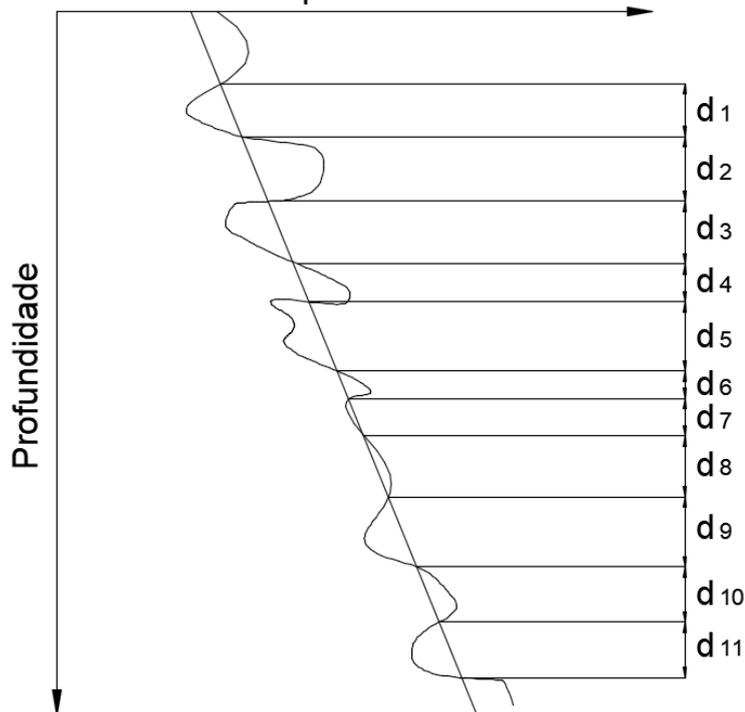
Viviescas *et al.* (2021) afirmam que a escala de flutuação horizontal está relacionada ao processo de formação dos materiais e que os solos formados por escorregamentos anteriores resultarão em um material mais heterogêneo em comparação aos solos que nunca foram transportados e com mudanças no estado de intemperismo com a profundidade do que os solos residuais. Já para as escalas verticais, os autores afirmam que os resultados são influenciados pelas tensões efetivas verticais, e podem ser independentes do processo de formação do solo.

Na sequência são apresentados de forma sucinta os métodos que podem ser utilizados para cálculo da escala de flutuação, como: Método Expedito de Vanmarcke, Integração da Função de Autocorrelação e Adequação do Modelo de Autocorrelação.

2.1.4.1 Método expedito de Vanmarcke

De acordo com Kenarsari *et al.* (2013), a escala de flutuação pode ser relacionada à distância média entre dois pontos consecutivos onde o perfil geral da propriedade do solo e sua linha de tendência se cruzam. A Figura 4 e a Equação 8 mostram como obter a distância média de cruzamento, onde d_1, d_2, \dots, d_n são as distâncias de intersecção.

Figura 4 – Distância média de interseção para o cálculo da escala de flutuação



Fonte: adaptado de Kenarsari et al. (2013)

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (8)$$

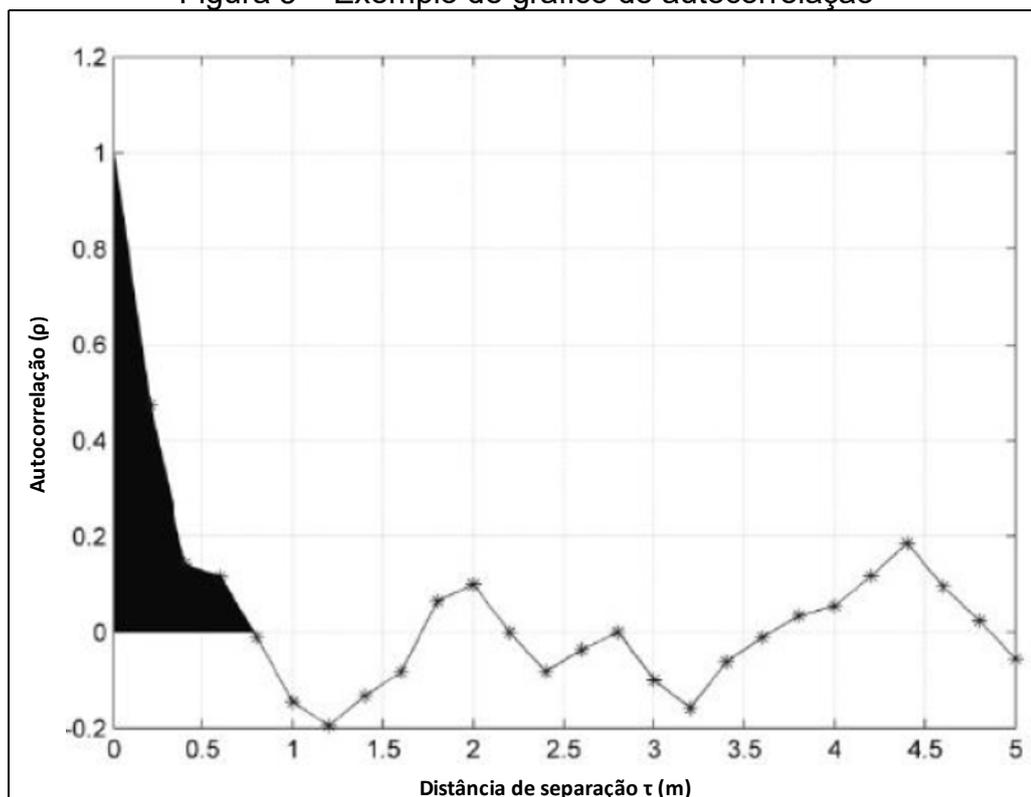
A Equação 9 mostra a aproximação proposta por Vanmarcke (1977) para a estimativa da escala de flutuação.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \bar{d} = 0,8\bar{d} \quad (9)$$

2.1.4.2 Integração da função de autocorrelação da amostra (IAA)

De acordo com Kenarsari *et al.* (2013) a função de autocorrelação da amostra é primeiramente plotada em função da distância de separação, e a área sob este gráfico foi sugerida como a escala de flutuação, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de gráfico de autocorrelação



Fonte: adaptado de Kenarsari et. al (2013)

A Equação 10 apresenta a fórmula de cálculo da escala de flutuação, sendo duas vezes a área supracitada. Nesta relação ρ é a função de autocorrelação amostral estimada e τ é a distância de separação entre duas medições.

$$\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho d\tau = 2 \int_0^{+\infty} \rho d\tau \quad (10)$$

2.1.4.3 Adequação do modelo de autocorrelação (AMA)

Essa metodologia objetiva encontrar funções teóricas (modelos matemáticos) que melhor descrevem as funções autocorrelação de dados, de acordo com Kenarsari *et al.* (2013). A Tabela 3 apresenta as funções teóricas usuais e respectivas frequências de utilização, ou seja, percentuais de estudos da tabela a seguir que adotaram um modelo particular.

Tabela 3 – Modelos de autocorrelação

Modelo de autocorrelação	Função de autocorrelação	Frequência de utilização (%)
Exponencial simples	$\rho(\tau) = \exp\left\{\frac{-2 \tau }{\theta}\right\}$	48
Segunda ordem de Markov	$\rho(\tau) = \left(1 + 4\frac{ \tau }{\theta}\right) \exp\left\{-4\frac{ \tau }{\theta}\right\}$	5
Terceira ordem de Markov	$\rho(\tau) = \left(1 + \frac{16 \tau }{3\theta} + \frac{256}{27}\left(\frac{ \tau }{\theta}\right)^2\right) \exp\left\{-\frac{16 \tau }{3\theta}\right\}$	-
Exponencial quadrática	$\rho(\tau) = \exp\left\{-\pi\left(\frac{ \tau }{\theta}\right)^2\right\}$	19
Esférica	$\rho(\tau) = \begin{cases} \frac{4}{3} - 2\frac{ \tau }{\theta} + \frac{2}{3}\frac{ \tau ^3}{\theta^3}, & \text{if } \tau \leq \theta; \\ 0, & \text{else} \end{cases}$	7
Exponencial cosseno	$\rho(\tau) = \exp\left\{-\frac{ \tau }{\theta}\right\} \cos\left\{\frac{ \tau }{\theta}\right\}$	8
Ruído binário	$\rho(\tau) = \begin{cases} 1 - \tau /\theta, & \text{if } \tau \leq \theta \\ 0, & \text{else} \end{cases}$	12
Whittle-Matérn	$\rho(\tau) = \frac{2}{\Gamma(\nu)} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+0.5) \tau }{\Gamma(\nu)\theta} \right\}^\nu K_\nu \left\{ \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\nu+0.5) \tau }{\Gamma(\nu)\theta} \right\}$	-

Fonte: adaptado de Cami et al. (2020)

Os autores Bilesky e Hachich (2018) modelaram a variabilidade do solo com diferentes extensões de correlação espacial e diferentes formas funcionais do modelo de autocorrelação objetivando calcular a probabilidade de ruína de um talude, concluindo que a forma funcional da estrutura de correlação pode influenciar tanto na probabilidade de ruína quanto no dimensionamento de um aterro. Ao realizar o dimensionamento probabilístico do aterro, foi calculado o comprimento da berma que leva a uma probabilidade de ruína de 10^{-2} para diferentes modelos de correlação espacial. Comparando dois modelos com o mesmo comprimento de correlação, mas diferentes formas funcionais da estrutura de correlação (exponencial e gaussiana), a variação no comprimento da berma foi de 20%.

2.2 Método de equilíbrio limite e probabilidade de falha

Métodos de equilíbrio limite aplicados à análise de estabilidade de taludes consistem na definição de uma superfície de falha onde atuam forças instabilizantes e estabilizantes. Equações de equilíbrio de esforços são aplicados pelos diferentes

métodos para quantificação do Fator de Segurança (FS). De forma geral, o fator de segurança é escrito pela relação entre esforços resistentes e esforços atuantes. Para quantificação da probabilidade de falha (P_f), utilizando um método de equilíbrio limite, de forma geral são necessárias repetidas realizações em uma abordagem de Monte Carlo (MCM). A partir do conjunto de realizações, pode ser calculada a probabilidade de falha de acordo com a Equação 11.

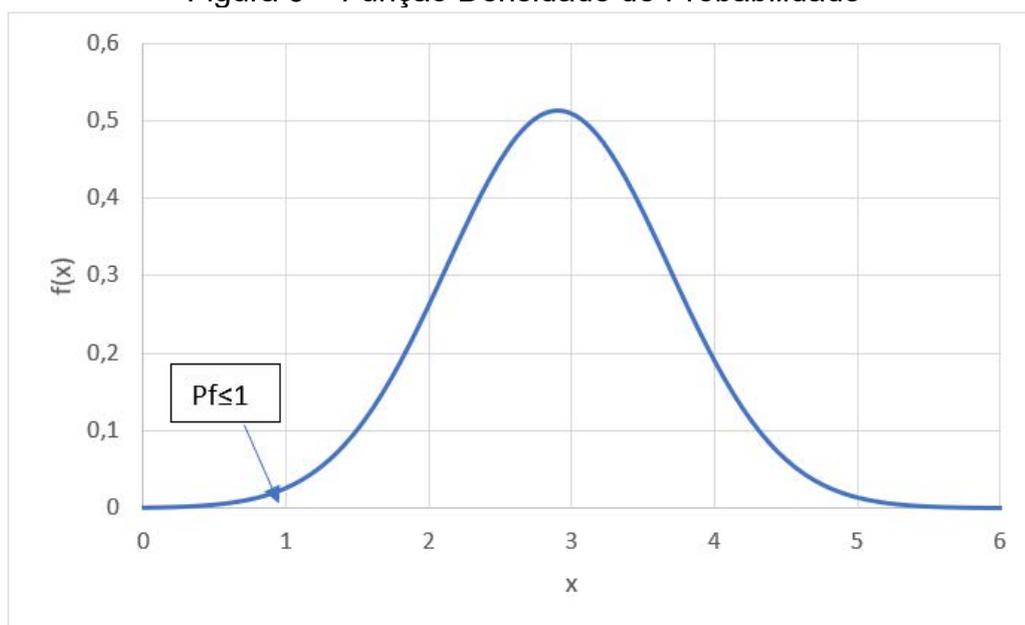
$$P_f = \frac{n_f}{n_t} \quad (11)$$

Onde n_f é o número de instâncias de simulação que atingem falha de talude ($FS < 1$) e n_t é o número total de instâncias de simulações.

A probabilidade de falha é um índice relacionado ao fator de segurança ser menor do que 1, onde ao final de todas as interações do método obtém-se o histograma dos resultados.

No gráfico da função densidade de probabilidade a área abaixo da curva significa a probabilidade de 100%, ou valor unitário, para o fator de segurança. Calculando-se a probabilidade acumulada, o intervalo da probabilidade de falha está representado pela área menor ou igual a 1, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Função Densidade de Probabilidade



De acordo com Santamarina *et al.* (1992) os valores limites aceitáveis de probabilidade de falha para taludes são os apresentados na Tabela 4.

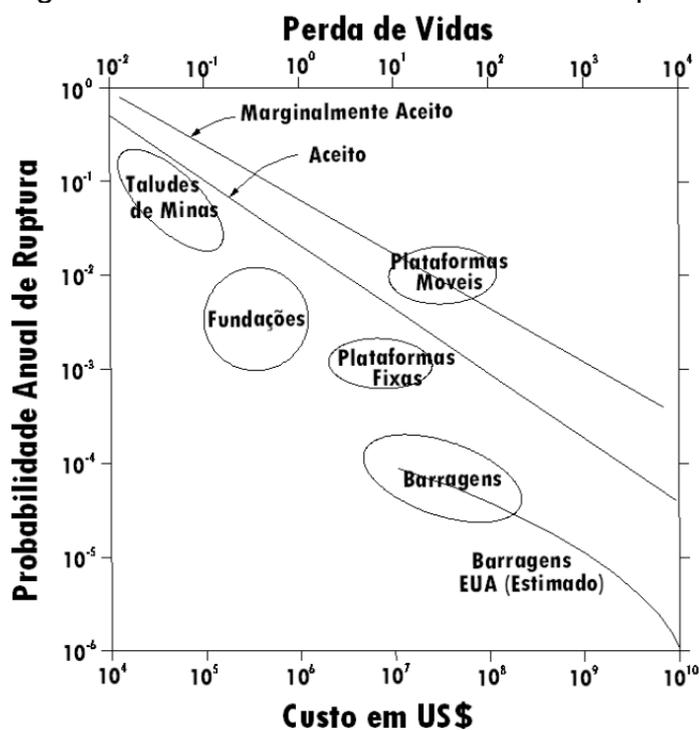
Tabela 4 – Probabilidades de falha aceitáveis para estabilidade de taludes

Condição	PF (%)
Estruturas temporárias, sem potencial de perdas de vida	0,1
Sem consequências de falha	0,1 a 0,2
Taludes de margem de rio	0,05
Baixa consequência de falha. Reparo pode ser feito quando tempo permitir	0,01
Cortes extensos existentes em rodovias interestaduais	0,01 a 0,02
Cortes extensos a serem construídos em rodovias interestaduais	< 0,01
Aceitável na maioria dos casos, se risco de perda de vida	0,001
Aceitável para qualquer talude	0,0001

Fonte: adaptado de Santamarina *et al.* (1992)

Já Baecher (1982) relaciona as probabilidades admissíveis de ruptura para tipos diferentes de obras, correlacionando com perdas de vida e custo, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Probabilidades admissíveis de ruptura



Fonte: Baecher (1982)

Resumidamente, a análise probabilística quantifica incertezas relacionadas ao fator de segurança, baseada na probabilidade de falha e no índice de confiança, sendo este definido pela relação entre a média da distribuição de probabilidade e o desvio padrão da distribuição de probabilidade. Métodos existentes que determinam a probabilidade de falha e o índice de confiança são: Método de Monte Carlo, Método FOSM e Método Rosenblueth ou Estimativas Pontuais. Na presente pesquisa será utilizado o Método de Monte Carlo, sendo brevemente descrito a seguir.

2.2.1 Método de Monte Carlo

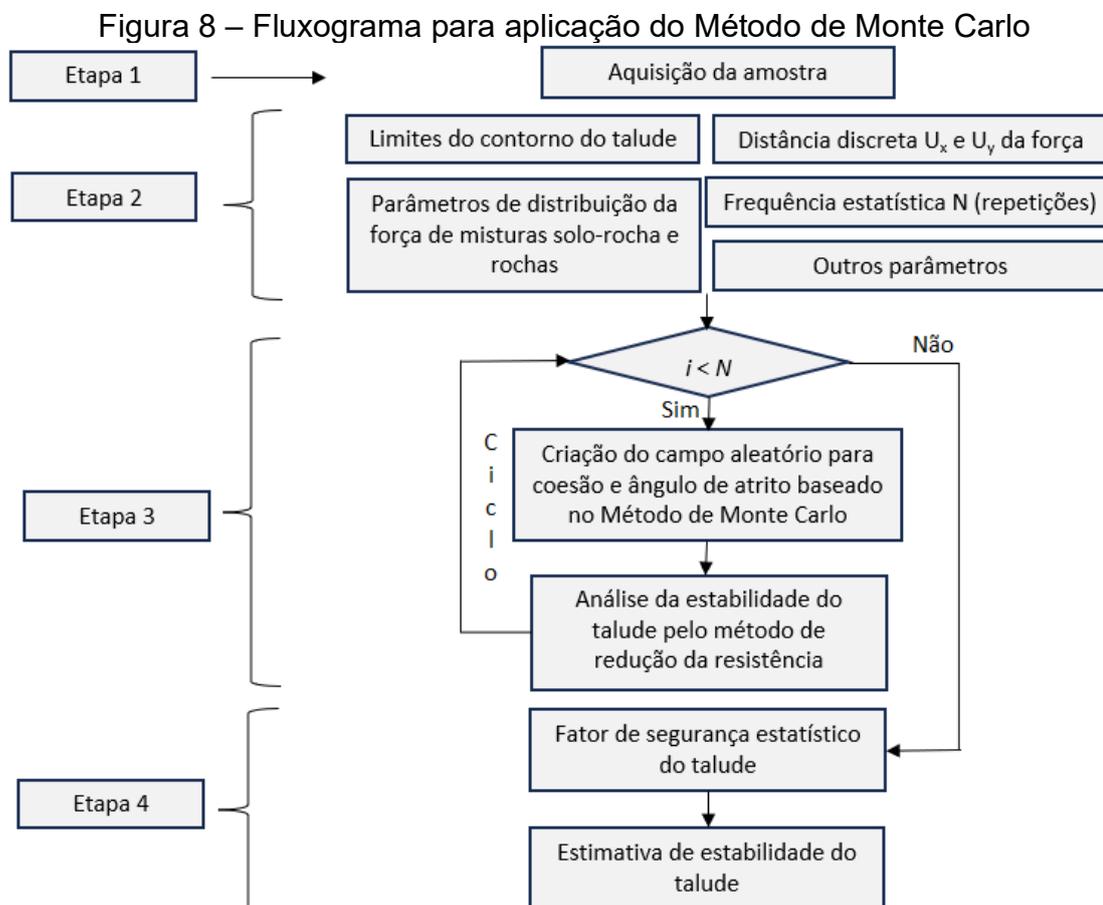
O Método de Monte Carlo (MMC) foi desenvolvido em 1949 por John von Neumann e Stanislaw Ulam, tornando-se uma poderosa ferramenta para simulação de análises de confiabilidade, de acordo com Abdulai e Sharifzadeh (2021).

De acordo com Jha e Ching (2013), uma única camada de solo possui propriedades naturais diferentes no espaço. Na prática, a adoção de um único fator de segurança para a avaliação da estabilidade de um talude não é condizente com a variabilidade das propriedades do solo, sendo preferível uma análise de estabilidade probabilística de acordo com a probabilidade de falha.

Conforme Abudali e Sharifzadeh (2021) o MMC gera um número aleatório para cada uma das variáveis aleatórias de entrada no problema e faz combinações entre todas elas para realizar diversos cálculos determinísticos. A precisão do método depende do número de simulações realizadas e aumenta com o aumento do número de simulações.

Conforme citado por Zhou *et al.* (2020) a aplicação do Método de Monte Carlo na análise de estabilidade de taludes inclui quatro etapas: aquisição da amostra, parâmetros do modelo de entrada, cálculo cumulativo e análise dos resultados estatísticos. Na Figura 8 adaptada dos autores é mostrado um fluxograma de aplicação do método, onde após as definições básicas do talude e interação (verificação da estabilidade/cálculo do fator de segurança FS) é verificado se o número de interações i é inferior a N (número total de interações). Se o número de interações é inferior a N , são acumulados os valores de FS para cálculo de FS médio e distribuição de FS, novo modelo estatístico é desenvolvido e retomada a análise.

Por outro lado, quando o número de interações i for superior ou igual a N , os valores de FS são acumulados, porém encerra-se a análise.



Fonte: adaptado de Zhou et al. (2020)

Importante destacar que no fluxograma descrito por Zhou *et al.* (2020) observa-se que os autores utilizaram um método de redução da resistência para definição de um fator de segurança. Abordagem que costuma ser adotada em modelagens utilizando elementos finitos.

Em relação ao número de interações (N), pode-se, a partir de um nível de confiança e erro aceitável, estimar um número de rodadas necessárias para estabilização da resposta do problema. A resposta de um problema de estabilidade de taludes costuma ser avaliada em relação a estabilização do valor médio do fator de segurança. Nas equações 12 e 13 são apresentadas as propostas de Fishman (1995) para cálculo do número necessário de interações.

$$n_c(\xi, \delta) = \frac{1}{4\delta\xi^2} \quad (12)$$

$$n_N(\xi, \delta) = \left[\frac{\Theta^{-1}(1-\frac{\delta}{2})}{2\xi} \right]^2 \quad (13)$$

Para as equações 12 e 13 tem-se:

- ξ : erro;
- δ : confiança;
- $\Theta^{-1}(x)$: expressão inversa da função distribuição acumulada.

De acordo com Fishman (1995) os resultados da Equação 12 costumam ser superiores em relação ao número de amostras necessárias. Já para a Equação 13 o autor comenta que pesquisadores adotam o dobro do resultado da equação.

As equações apresentadas foram utilizadas por Baecher e Christian (2003) para construção da Tabela 5, que relaciona índices de confiança e erros associados ao número de rodadas mínimo (N). Dessa forma, para um erro admitido de 0,1 e nível de confiança de 90%, por exemplo, o número de tentativas adequado pode ser de 250 ou 68 dependendo da metodologia adotada. No presente trabalho foram adotadas 1.000 interações para cada simulação.

Tabela 5 – Modelos de autocorrelação

ξ	90% de confiança		95% de confiança	
	n_c	n_N	n_c	n_N
0,005	100.000	27.056	200.000	38.415
0,01	25.000	6.764	50.000	9.604
0,02	6.250	1.691	12.500	2.401
0,03	2.778	752	5.556	1.068
0,04	1.563	423	3.126	600
0,05	1.000	271	2.000	385
0,1	250	68	500	97
0,2	63	17	126	25
0,3	28	8	56	11
0,4	16	5	32	4
0,5	10	3	20	4

Fonte: adaptado de Baecher e Christian. (2003)

2.2.2 Soluções utilizando campo homogêneo sem variação espacial

As soluções utilizando campos homogêneos são as mais utilizadas de forma prática nas análises probabilísticas de taludes, como pode ser observado nos trabalhos de Li (2024), Dyson e Tolooiyan (2019) e Zhu *et al.* (2015). Nestas, assume-se um único material e/ou parâmetros únicos dentro de uma camada e a cada nova rodada são assumidos valores distintos aleatórios dos parâmetros.

Na sequência, computa-se os valores dos fatores de segurança de cada rodada, calculando-se o valor médio do fator de segurança e a sua distribuição.

Entre os dados de entrada estão os valores unitários dos parâmetros geotécnicos com seus respectivos coeficientes de variação, entretanto sem considerar escalas de flutuação nas análises. A aleatoriedade está presente a cada rodada, mas não de forma espacial.

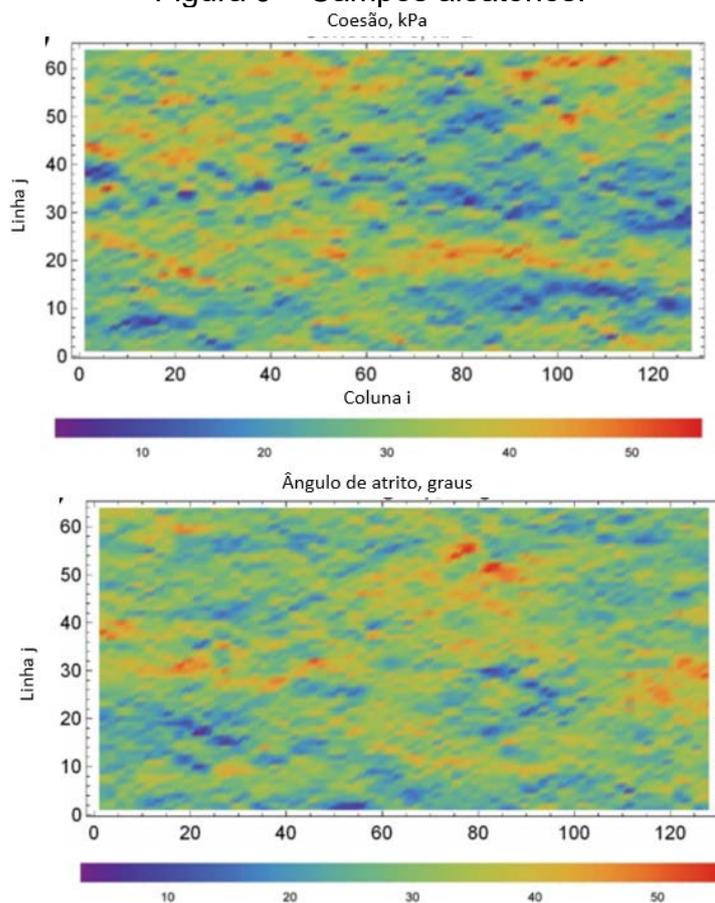
Como resultado, são obtidos os fatores de segurança para cada método escolhido na análise, acompanhados das respectivas probabilidades de falha.

2.2.3 Soluções utilizando campo aleatório

As soluções que utilizam campos aleatórios baseiam-se na estatística para os dados de entrada, levando em consideração as incertezas das propriedades geotécnicas, acrescentando a variabilidade espacial em modelos de confiabilidade.

O objetivo é determinar probabilidade de falha através de diversas simulações, considerando em cada simulação um material com variabilidade espacial de um determinado parâmetro geotécnico, como coesão, ângulo de atrito ou peso específico, que varia a cada rodada. Exemplos ilustrativos de campos aleatórios de coesão e ângulo de atrito são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Campos aleatórios.



Fonte: adaptado de Alamanis e Dakoulas (2021)

De acordo com Fenton e Griffiths (2018) existem diferentes algoritmos geradores de campos aleatórios, sendo os mais utilizados o Método da média móvel (MA), Decomposição da matriz de covariância (DMC); Método de transformada discreta de Fourier (DFT); Método de transformação rápida de Fourier (FFT); Método de bandas giratórias (TBM); e o Método de subdivisão da média local (LAS). Dentre estes, o método LAS apresenta-se como vantajoso para aplicações devido a sua incorporação no software RFEM, *Random Finite Element Method*, software de acesso livre proposto pelos autores. Mas recentemente, o software de Equilíbrio Limite desenvolvido pela Bentley, Plaxis LE, tem incorporado o algoritmo LAS para desenvolvimento de análises probabilísticas.

O LAS (*Local Average Subdivision*) é um dos métodos que modela a variabilidade espacial, sendo apresentado por Fenton e Vanmarcke (1990), produzindo médias locais sobre um conjunto discreto de células, sendo indicado para modelagem de elementos finitos e em equilíbrio limite. De acordo com os autores é

um método atraente porque quase todas as propriedades de engenharia, como ângulo de atrito e coesão, são baseadas em médias locais. A cada estágio de subdivisão da propriedade de um material as células são divididas em duas, recebendo, cada uma, um valor aleatório. As médias locais são médias para o valor global, permanecendo constante no final. As estatísticas dos valores das células são ajustadas corretamente conforme o tamanho da célula muda. A Tabela 6 apresenta um compilado de trabalhos recentes com a utilização de variabilidade espacial. Em especial, observa-se as utilizações do RFEM, mais recentemente incorporados ao software de elementos finitos Abaqus e em equilíbrio limite no software Plaxis.

Wu *et al.* (2024) compararam a estabilidade de taludes 2D e 3D e solos espacialmente variáveis usando métodos de elementos finitos aleatórios. Viviescas *et al.* (2021) avaliaram a influência geológica na variabilidade espacial dos solos. Wang *et al.* (2020) realizaram análises de estabilidade de taludes considerando resistência ao cisalhamento não drenado espacialmente variável. Jiang *et al.* (2016) analisaram a confiabilidade de taludes em níveis de baixa probabilidade em solos espacialmente variáveis. Estes dois últimos trabalhos citados são alguns que utilizam a variabilidade de coesão e ângulo de atrito, conforme pode ser observado na Tabela 6. Ainda, observa-se que a FDP mais utilizada nas aplicações é a lognormal.

Tabela 6- Referências de estudos

Referência	Método / Software de análise	FDP	Variável aleatória
Branco (2014)	Equilíbrio Limite - Slide	Lognormal	c, ϕ
Jiang e Huang (2016)	-	Lognormal	c, ϕ, S_u
Liu et al. (2018)	Elementos finitos - Abaqus	Lognormal	S_u
Wang et al. (2020)	Elementos Finitos - Abaqus	Lognormal	c, ϕ, S_u
Viviescas et al. (2021)	Elementos Finitos – RFEM	-	N_{SPT}
Ziesman (2022)	Elementos Finitos – RFEM e Abaqus	Lognormal	q_c, q_t, f_s, S_u
Wu et al. (2024)	Elementos Finitos – RFEM, Plaxis 2D e 3D	Lognormal	Módulo Young, Coeficiente de Poisson, peso específico

3 ESTUDO DE CASO

No presente capítulo apresenta-se a região de estudo de caso, composta por solo residual de granito. São brevemente descritos aspectos pertinentes ao projeto de engenharia e ensaios existentes e sondagens e ensaios executados. Na sequência é apresentada a descrição da metodologia de trabalho da pesquisa a ser desenvolvida.

3.1 Elementos do projeto de engenharia

A rodovia estadual SC-108 é de extrema importância para o Estado de Santa Catarina, pois é uma rodovia que atravessa quase que integralmente todo o estado de norte a sul, paralela à BR-101/SC. Inicia em Joinville e finaliza no município de Praia Grande, na divisa com o Estado do Rio Grande do Sul.

O presente estudo trata do trecho da rodovia SC-108 compreendido entre os municípios de Urussanga e Criciúma, passando pelo município de Cocal do Sul. O escopo do projeto de engenharia contratado pela Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade – SIE junto à empresa Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda., foi o aumento de capacidade da rodovia através da duplicação, incluindo o contorno leste de Cocal do Sul. O trecho de projeto, seguindo predominantemente a direção sul, possui extensão total de 16,4 km, iniciando no km 353,3 e finalizando no km 369,7. O contorno de Cocal do Sul inicia no km 357,5 e finaliza no km 367, com extensão de 9,5 km, possuindo relevo ondulado/montanhoso com elevados cortes e aterros.

Os solos ocorrentes na região de Cocal do Sul, conforme Bortoluzzi (2018), são predominantemente residuais e apresentam grande diversidade granulométrica que reflete a heterogeneidade litológica. Nas porções de ocorrências dos depósitos quaternários aluvionares há predomínio das frações arenosas, com possíveis inclusões de níveis síltico argilosos e pouca matéria orgânica. Estes depósitos apresentam-se localizados em áreas restritas e pela conformação das planícies aluvionares que formam não possuem grande espessura.

Bortoluzzi (2018) cita que nas porções onde ocorre a Formação Rio do Sul, a heterogeneidade dos seus termos litológicos contribui para a variedade de tipos pedológicos que se observa. Os folhelhos e argilitos possibilitam a formação de solos

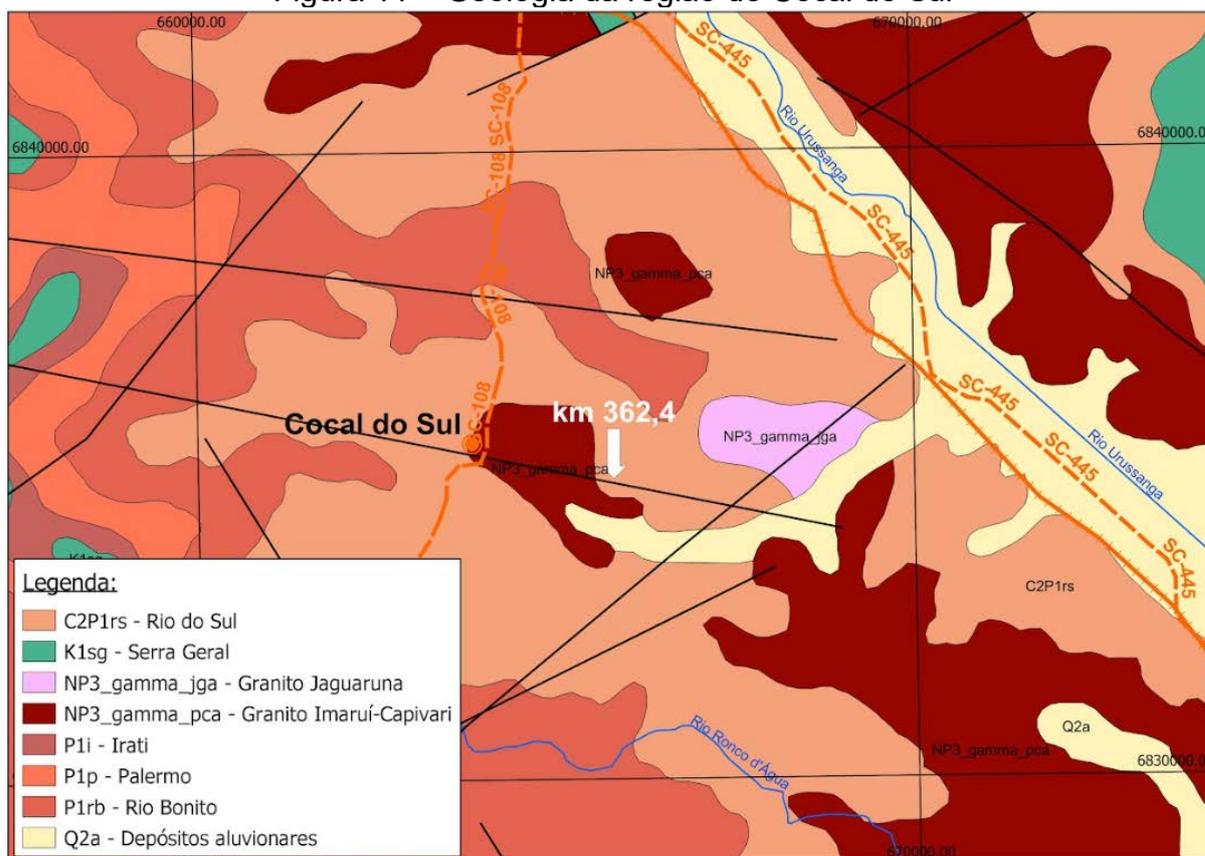
residuais profundos predominantemente siltico argilosos, potencialmente expansivos, enquanto que os arenitos geram solos areno siltosos ou argilosos menos profundos. No campo de domínio das rochas granitóides os solos gerados são função da granulação da rocha matriz, a qual apresenta variações desde fina até maiores, e de sua composição mineralógica que é alcalina a subalcalina. Na porção de ocorrência destas rochas os solos apresentam-se argila arenosos, onde a granulação é fina e o teor de minerais alcalinos elevado passando a areno argilosos quando a granulação é mais grosseira. Os perfis pedológicos gerados apresentam horizonte B bastante desenvolvido e profundo, passando ao horizonte C que, via de regra, também apresenta grande espessura.

A Tabela 7 apresenta as tipologias e localização dos solos ao longo do contorno de Cocal do Sul.

Tabela 7- Tipologia e localização dos solos

Ca14	Cambissolo
Textura	Argilosa
Relevo	Fortemente ondulado a montanhoso
Saturação	Álico
Profundidade	60 a 150 cm para a rocha ou camada de impedimento
Drenagem	Moderadamente drenado.
Uso Agrícola	Agricultura e pastagens
HGPa7	Glei Pouco Húmico
Textura:	Média
Relevo:	Plano
Saturação:	Álico
Profundidade	Inferior a 60 cm para rocha ou camada de impedimento
Drenagem:	Mal drenado
Uso Agrícola:	Agricultura
PVa15	Cambissolo
Textura	Média
Relevo	Ondulado.
Saturação	Bom para agricultura e pastagens
Profundidade	60 a 150 cm para a rocha ou camada de impedimento
Drenagem	Moderadamente drenado.
Uso Agrícola:	Agricultura
PVa6	Podzólico Vermelho-Amarelo
Textura	Argilosa.
Relevo	Suave ondulado.
Saturação	Álico.
Profundidade	60 a 150 cm para a rocha ou camada de impedimento
Drenagem	Moderadamente drenado
Uso Agrícola	Agricultura
PVa1	Podzólico Vermelho-Escuro
Textura	Muito argilosa.
Relevo	Suave ondulado.
Saturação	Álico.
Profundidade	60 a 150 cm para a rocha ou camada de impedimento
Drenagem	Moderadamente drenado
Uso Agrícola	Agricultura

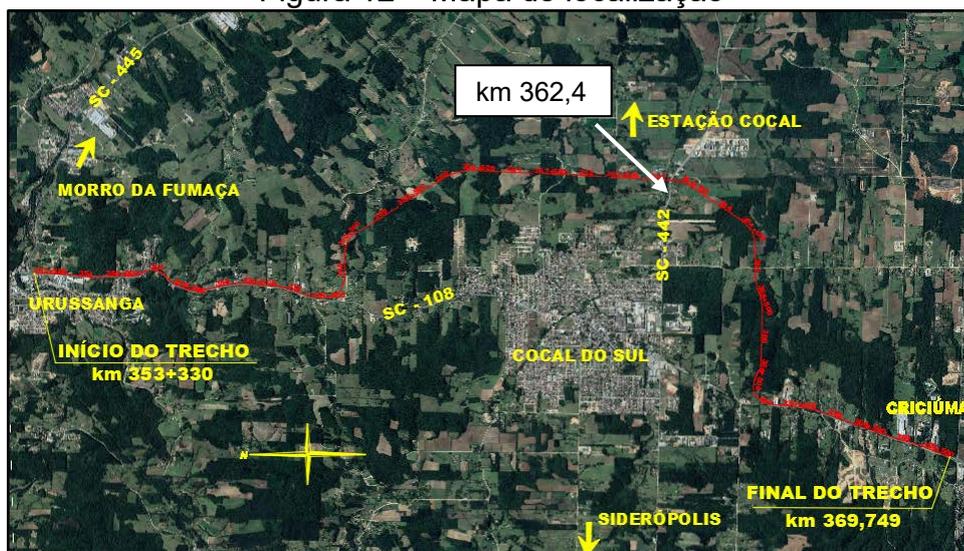
Figura 11 – Geologia da região de Cocal do Sul



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2023)

O local do presente estudo está situado no km 362,4 da rodovia SC-108, onde, conforme projeto de engenharia e demonstrado na Figura 16, deverá ser realizado um corte de 19 m de altura. No plano horizontal o traçado encontra-se em tangente e no plano vertical em curva vertical convexa, com parâmetros compatíveis com as normas vigentes, resultando então no corte supracitado. A Figura 12 apresenta o mapa de localização do trecho.

Figura 12 – Mapa de localização



Fonte: Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. (2021)

A Figura 13 apresenta a região do estudo, com o traçado sobre a imagem aérea. As linhas brancas representam os offsets de terraplenagem resultantes do projeto geométrico, demonstrando a área de abrangência atingida. Em amarelo, a quilometragem da rodovia.

Figura 13 – Região de estudo

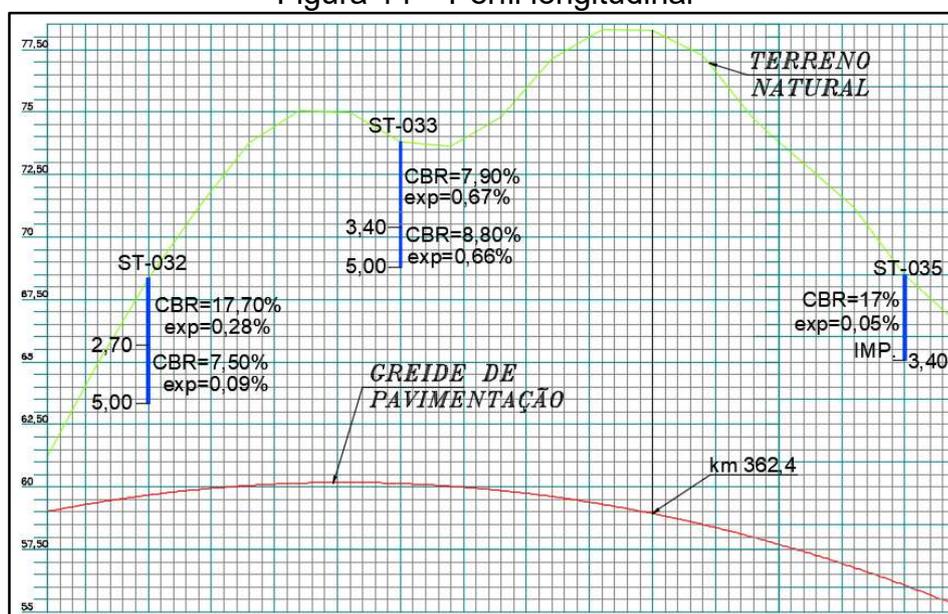


Fontes: Google e Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. (2021)

Na Figura 14 é apresentado o perfil longitudinal do projeto, com a linha verde representando o terreno natural e a linha vermelha o greide de pavimentação

projetado. Cada linha vertical representa 0,5 m e cada linha horizontal representa 5 m. No perfil também está representado o km 362,4.

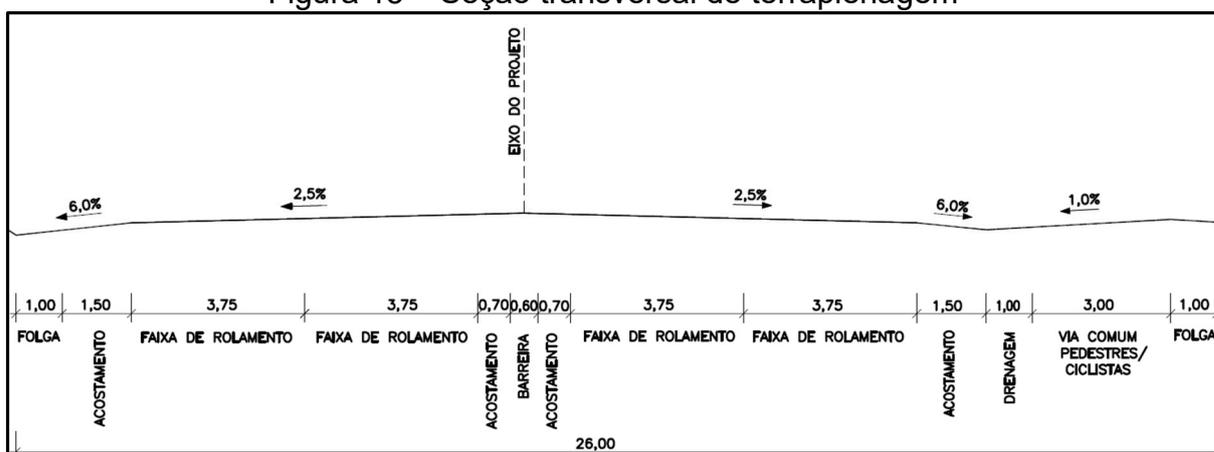
Figura 14 – Perfil longitudinal



Fonte: Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. (2021)

A rodovia foi projetada em pista dupla e largura total de terraplenagem de 26 m, conforme Figura 15 (medidas em metro, quando não indicado). São apresentados também os elementos constituintes do projeto geométrico.

Figura 15 – Seção transversal de terraplenagem

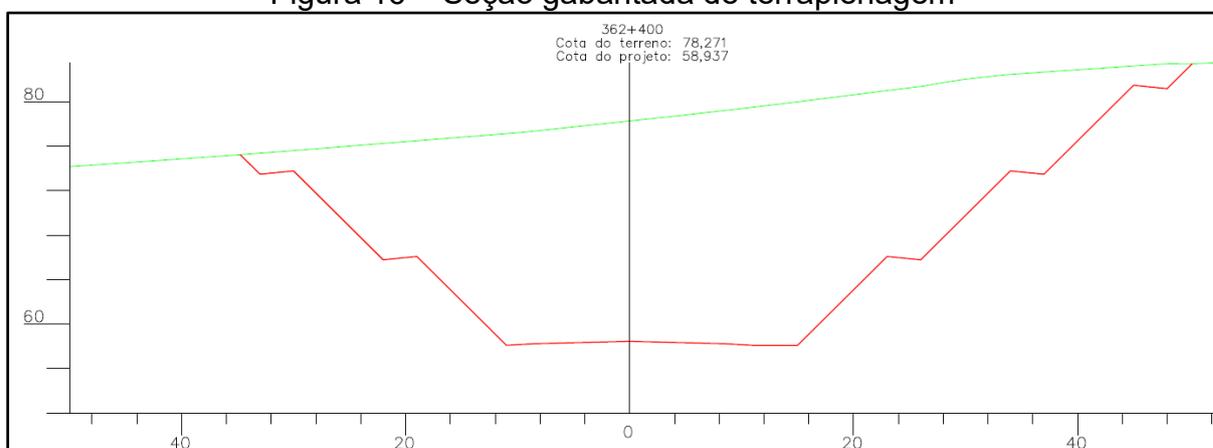


Fonte: Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. (2021)

A Figura 16 a seguir apresenta a seção gabaritada de terraplenagem no km 362,4 da rodovia, onde a linha verde também representa o terreno natural e a linha

vermelha a configuração da plataforma da rodovia em sua base. Os taludes foram configurados com inclinação de 1(V):1(H) e banquetas de 3 m de largura a cada 8 m de altura.

Figura 16 – Seção gabaritada de terraplenagem



Fonte: Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. (2021)

Nota-se que o talude do lado direito representado é o maior talude resultante de todo o corte apresentado na Figura 14. Esta foi a razão de escolha deste local para o presente estudo, tendo em vista que a altura de corte está diretamente relacionada com os fatores de segurança para estabilidade de taludes.

No perfil longitudinal apresentado estão locados três furos de sondagem a trado, ST-32, ST-33 e ST-35, realizados à época do projeto. A sondagem ST-33, localizado no km 362,3, consiste em uma sondagem a trado que foi executada até a profundidade de 5,00 m. O solo retirado desta região foi classificado como solo fino, percentual passante na peneira 200 de 85%, predominantemente argiloso, tipo A-6 de acordo com a metodologia HRB de classificação, limite de liquidez de 34,3% e índice de plasticidade de 12,9%, resultando na classificação CL pela metodologia SUCS, indicando argila de baixa compressibilidade.

Já a sondagem a trado ST-35, situada no km 362,5, possui profundidade de 3,40 m e solo com percentual passante na peneira 200 de apenas 13%, configura-se como solo granular, predominantemente formado por fragmentos de pedra, pedregulhos e areia. Com limite de liquidez de 33% e índice e plasticidade de 9% foi classificado como A-1-B pela metodologia HRB e SM pela Metodologia SUCS, indicando areia siltosa.

Importante destacar, com base na análise das sondagens disponíveis, a heterogeneidade dos materiais da região com dois materiais bem distintos, um bem fino e o outro granular, numa distância de 200 m.

A empresa Iguatemi Engenharia, durante a elaboração do projeto de engenharia, executou 31 sondagens a trado no Contorno de Cocal do Sul, coletando 43 amostras deformadas para ensaios laboratoriais de caracterização.

A Tabela 8 apresenta o resumo dos seguintes ensaios: granulometria por peneiramento, limite de liquidez, índice de plasticidade, índice de grupo e classificação HRB, além da classificação tátil visual no momento da coleta.

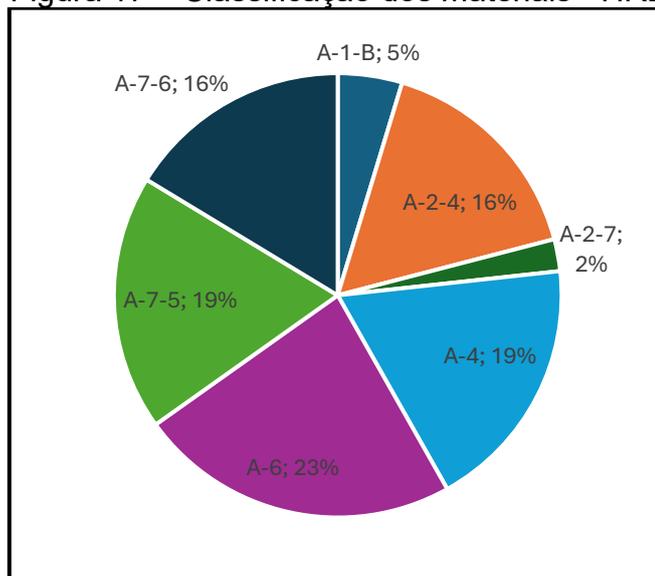
Tabela 8 – Resumo dos ensaios

Nº DO FURO	km	HORIZONTE (m)	CLASSIFICAÇÃO TACTIL/VISUAL	LL	IP	Granulometria								IG	Classif. HRB
						2"	1"	3/4"	3/8"	# 4	# 10	# 40	# 200		
ST 015	357 + 980	0,15 a 1,50	Argila siltosa, marrom claro	30,5	7,8	100,0	100,0	100,0	99,0	92,2	69,5	33,3	20,1	0	A-2-4
		1,50 a 3,50	Silte arenoso, marrom claro	NP	NP	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	98,7	86,0	12,3	0	A-2-4
		3,50 a 5,00	Silte argiloso, bege claro	27,6	7,6	100,0	100,0	100,0	97,1	89,6	74,4	46,6	26,8	0	A-2-4
ST 016	358 + 100	0,00 a 2,50	Silte arenoso, marrom claro	NP	NP	100,0	100,0	100,0	99,3	98,9	97,6	93,5	24,5	0	A-2-4
		2,50 a 3,80	Silte argiloso, bege claro	NP	NP	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,4	95,3	26,4	0	A-2-4
ST 017	358 + 240	0,20 a 2,20	Silte argiloso, variegado	30,1	6,8	100,0	100,0	100,0	99,8	98,6	94,7	85,9	81,0	6	A-4
		2,20 a 5,00	Argila siltosa, bege, claro	34,2	9,8	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	98,2	95,8	93,9	7	A-4
ST 019	358 + 900	0,15 a 1,50	Argila siltosa, marrom	60,8	29,8	100,0	100,0	100,0	98,8	97,7	96,2	86,7	80,1	20	A-7-5
		1,50 a 4,10	Silte argiloso, variegado	41,5	18,2	100,0	100,0	100,0	99,4	98,6	95,4	86,8	82,6	12	A-7-6
ST 020	359 + 040	0,00 a 1,60	Areia siltosa, variegada, compacta	25,3	5,5	100,0	100,0	100,0	86,7	76,6	69,5	59,8	46,6	1	A-4
ST 021	359 + 180	0,35 a 2,40	Argila arenosa, amarelada, com fragmentos de rocha alterada	NP	NP	100,0	100,0	100,0	99,2	97,0	93,6	79,0	26,2	0	A-2-4
ST 022	359 + 800	0,20 a 2,80	Silte argiloso, variegado	41,4	13,6	100,0	100,0	100,0	99,8	99,2	92,9	79,2	10	A-7-6	
		2,80 a 5,00	Silte argiloso, amarelo	32,4	8,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,8	99,2	97,0	77,0	6	A-4
ST 023	360 + 100	0,20 a 2,60	Argila siltosa, bege	51,1	25,8	100,0	100,0	100,0	99,9	99,7	98,9	94,6	17	A-7-6	
ST 024	360 + 200	0,20 a 3,10	Argila siltosa, variegada	39,8	14,5	100,0	100,0	100,0	99,2	97,7	91,9	87,5	10	A-6	
ST 025	360 + 300	0,20 a 4,10	Silte argiloso, variegado	38,2	15,9	100,0	100,0	100,0	99,1	90,1	59,2	42,7	4	A-6	
ST 026	360 + 400	0,20 a 3,80	Silte argiloso, bege	51,5	28,1	100,0	100,0	100,0	99,8	99,6	99,4	95,0	87,2	18	A-7-6
ST 027	360 + 500	0,20 a 3,40	Silte arenoso, bege	36,0	11,1	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	93,3	61,2	5	A-6	
ST 028	360 + 600	0,20 a 3,80	Argila siltosa, amarelada	32,6	13,6	100,0	100,0	100,0	98,7	95,1	69,2	59,0	5	A-6	
ST 029	361 + 100	0,30 a 3,20	Silte argiloso, variegado	57,3	30,7	100,0	100,0	100,0	99,7	98,5	96,9	92,8	85,0	20,0	A-7-6
ST 030	361 + 200	0,40 a 5,00	Areia argilosa, marrom	28,1	5,6	100,0	100,0	100,0	98,1	94,8	77,7	36,4	21,7	0	A-1-B
ST 031	361 + 920	0,20 a 2,10	Argila siltosa, bege	25,0	6,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,8	76,6	5	A-4	
		2,10 a 4,00	Silte arenoso, bege claro	NP	NP	100,0	100,0	100,0	99,4	98,6	93,9	76,7	37,3	0	A-4
ST 032	362 + 200	0,20 a 2,70	Argila arenosa, bege	45,9	17,2	100,0	100,0	100,0	99,9	99,4	89,6	58,7	46,4	6	A-7-6
		2,70 a 5,00	Argila siltosa, bege	59,8	26,5	100,0	100,0	100,0	98,8	81,7	56,5	43,1	9	A-7-5	
ST 033	362 + 300	0,20 a 3,40	Silte argiloso, bege	34,3	12,9	100,0	100,0	100,0	99,6	98,9	98,6	97,8	85,4	8	A-6
		3,40 a 5,00	Silte argiloso, variegado	35,7	14,6	100,0	100,0	100,0	99,9	98,9	97,3	90,0	80,6	9	A-6
ST 035	362 + 500	0,15 a 3,40	Argila siltosa marrom claro, com fragmentos de rocha alterada	33,0	9,0	100,0	100,0	100,0	93,6	78,2	54,1	21,5	13,5	0	A-1-B
ST 036	362 + 600	0,20 a 3,10	Argila arenosa marrom claro, com fragmentos de rocha alterada	25,5	9,1	100,0	100,0	100,0	99,3	90,0	64,0	28,0	15,5	0	A-2-4
ST 037	362 + 700	0,20 a 2,70	Argila arenosa, marrom claro, com fragmentos de rocha alterada	43,6	17,3	100,0	100,0	100,0	96,2	72,5	25,8	16,5	0	A-2-7	
ST 038	363 + 500	0,70 a 5,00	Argila siltosa, marrom	68,5	32,5	100,0	100,0	100,0	99,4	98,4	97,0	94,8	92,7	20	A-7-5
ST 039	363 + 800	0,00 a 1,60	Argila siltosa, avermelhada	76,7	31,2	100,0	100,0	100,0	98,2	94,9	88,8	83,1	20	A-7-5	
		1,60 a 3,80	Argila siltosa, marrom	52,6	18,8	100,0	100,0	100,0	99,7	97,6	93,5	86,4	80,9	14	A-7-5
ST 040	364 + 140	0,80 a 2,00	Argila siltosa, marrom escuro	51,0	19,7	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	96,9	78,4	14	A-7-5	
ST 042	364 + 760	0,60 a 1,00	Argila siltosa, avermelhada	56,7	22,9	100,0	100,0	100,0	99,6	98,5	94,5	65,2	15	A-7-5	
ST 043	365 + 160	0,35 a 3,50	Argila siltosa, marrom claro	31,3	11,4	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,1	84,7	7	A-6	
ST 044	365 + 400	0,20 a 4,00	Silte argiloso Variegado	67,4	34,1	100,0	100,0	100,0	99,2	97,8	92,8	90,4	20	A-7-5	
ST 045	365 + 560	0,30 a 2,20	Argila siltosa, marrom	35,1	19,5	100,0	100,0	100,0	99,7	99,0	94,6	68,7	10	A-6	
		2,20 a 5,00	Argila siltosa, alaranjada	52,3	30,3	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	98,2	90,8	19	A-7-6	
ST 047	366 + 320	0,20 a 4,00	Silte arenoso, amarelo claro	23,3	4,3	100,0	100,0	100,0	98,8	97,6	95,0	79,5	52,0	2	A-4
ST 048	366 + 580	0,20 a 2,60	Argila siltosa, marrom	32,5	9,6	100,0	100,0	100,0	98,8	97,1	96,6	95,8	85,3	7	A-4
		2,60 a 4,00	silte arenoso, marrom claro	28,1	11,2	100,0	100,0	100,0	99,1	97,0	94,8	86,0	41,8	2	A-6
ST 049	366 + 860	0,20 a 3,00	Silte arenoso, amarelo claro	29,3	11,8	100,0	100,0	100,0	99,8	99,5	98,9	94,2	42,6	2	A-6

Fonte: Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. (2021)

A Figura 17 apresenta o gráfico de classificação dos materiais de acordo com a metodologia HRB. Nota-se que 77% das amostras coletadas são solos finos e 23% são grossos, sendo que 58% de toda a amostragem possui a argila como constituinte usual.

Figura 17 – Classificação dos materiais - HRB



3.2 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do presente estudo foram realizados os seguintes serviços, detalhados no capítulo seguinte:

- Sondagem a trado com coleta de amostra deformada e ensaios de caracterização: granulometria por peneiramento, granulometria por sedimentação, limite de liquidez e limite de plasticidade. Os ensaios de caracterização foram realizados no laboratório de solos, asfalto e concreto da empresa Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda., montado para a supervisão das obras da SC-108;
- Sondagem mista (percussão + rotativa);
- Coleta de quarenta amostras indeformadas para execução de ensaios de cisalhamento direto. Para que a caracterização proposta seja representativa de um mesmo material, as 40 amostras foram coletadas em uma região de extensão de 1,15 x 1,15 m. A distribuição dos moldes seguiu a mesma formatação do trabalho desenvolvido por Branco (2014).

Destaca-se que todas as sondagens e coletas de amostras, deformadas e indeformadas, não foram feitas no eixo do projeto geométrico, mas sim, na crista do corte do talude do lado direito (vide Figura 16), material este que configurará o talude após a execução das obras de terraplenagem.

O primeiro passo do presente estudo foi a realização da sondagem mista, de forma a se conhecer as camadas de solo e rocha constituintes do local.

Na sequência foi realizada sondagem a trado e posteriormente os ensaios de laboratório para caracterização da camada de solo.

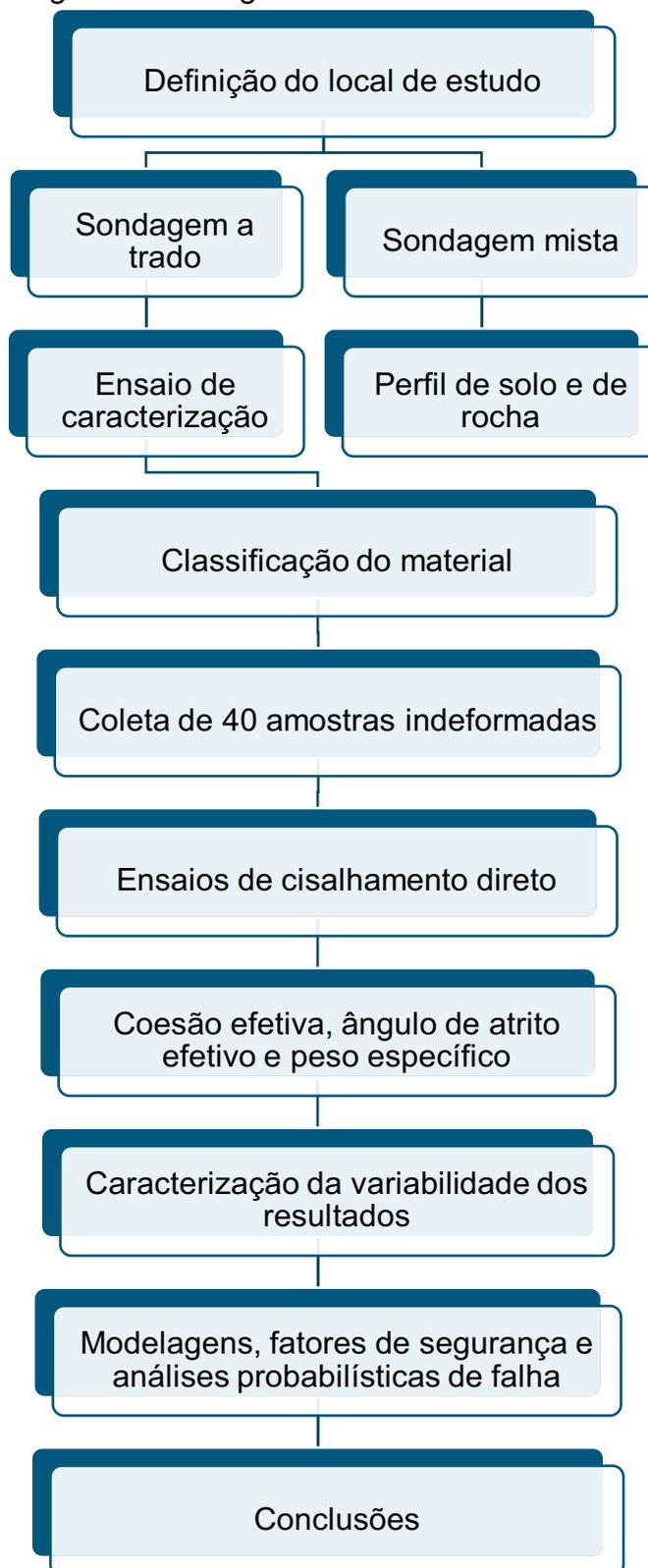
De posse das sondagens e dos ensaios descritos foi elaborada a correspondente curva granulométrica e a respectiva classificação do material, levando-se em consideração o percentual passante na peneira 200, o percentual do limite de liquidez e o percentual do índice de plasticidade.

Estabeleceu-se então o plano de coleta para as 40 amostras indeformadas para a realização de ensaios de cisalhamento direto. Com os resultados de coesão efetiva, ângulo de atrito efetivo e peso específico foram caracterizadas as variabilidades destes parâmetros, além da apresentação do conceito do ângulo de atrito secante ao pico, calculando-se então as escalas de flutuação horizontais.

Para a análise de estabilidade e probabilidade de falha foi utilizado o software Plaxis LE, modelando Equilíbrio Limite com Campo Aleatório, para caracterizar a variabilidade espacial. Foram consideradas duas etapas, sendo a primeira realizada uma análise de sensibilidade com parâmetros de bibliografia e a segunda com os resultados geotécnicos obtidos dos ensaios em Cocal do Sul.

A Figura 18 a seguir apresenta a metodologia de trabalho, descrita nos capítulos subsequentes.

Figura 18 – Diagrama de trabalho



4 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA – INTERPRETAÇÃO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS E DE VARIABILIDADE

Neste capítulo apresentam-se os resultados geotécnicos de caracterização da sondagem a trado, o perfil da sondagem mista, a metodologia para a coleta das amostras indeformadas e a interpretação estatística dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. Na sequência demonstra-se a aderência destes resultados com a função densidade de probabilidade, apresenta-se o conceito e os resultados do ângulo de atrito secante ao pico e o cálculo das escalas de flutuação horizontais.

4.1 Sondagem a trado e ensaios de caracterização

No dia 24 de abril de 2023 foi realizada uma sondagem a trado no km 362,4, com profundidade de 1,50 m, de forma a caracterizar o material. O objetivo foi investigar os horizontes de solo através de perfuração não revestida, possibilitando a coleta de amostras deformadas para a execução de ensaios geotécnicos de laboratório.

A execução da sondagem a trado seguiu as diretrizes contidas na norma ABNT NBR 9603, sendo um método de investigação que utiliza o trado como ferramenta de perfuração. O trado é um tipo de amostrador de solo constituído por lâminas cortantes, que pode ser composto por duas peças, de forma convexa (trado concha) ou única, de forma helicoidal, atravessando usualmente apenas a camada de solo de baixa resistência à perfuração.

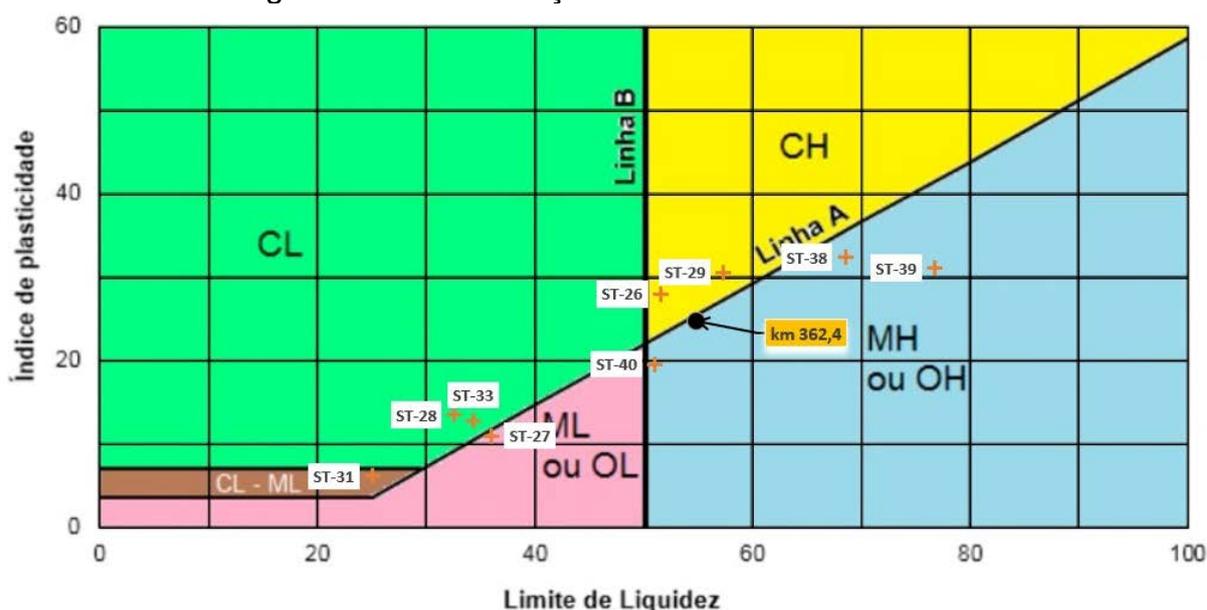
Conforme apresentado na Tabela 9 o material coletado no km 362,4 é fino, com percentual de 71,4% passante na peneira 200 e classificado como A-7-5 (argila como constituinte usual). O limite de liquidez é de 54,8% e o índice de plasticidade de 24,8%, com classificação MH ou OH, argila ou silte de alta compressibilidade, pela metodologia SUCS.

Tabela 9 – Caracterização e classificação do material

Pedregulho	Material grosso 28,6%			Material fino 71,4%		Limites de Consistência			Classificação	
	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP	HRB	SUCS
3,6%	2,9%	6,8%	15,3%	28,8%	42,6%	54,8%	33,0	24,8	A-7-5	MH ou OH

Para avaliar a variabilidade dos materiais na região em relação à classificação SUCS, foram plotadas na Carta Casagrande nove amostras ensaiadas no projeto da Iguatemi Engenharia classificadas como material fino (percentual passante na #200 maior que 50%), num raio de 2 km do km 362,4, sendo selecionado o horizonte B. A Figura 19 apresenta a classificação destas nove amostras, além do material coletado no km 362,4, sem avaliação de profundidade.

Figura 19 – Classificação SUCS dos materiais finos



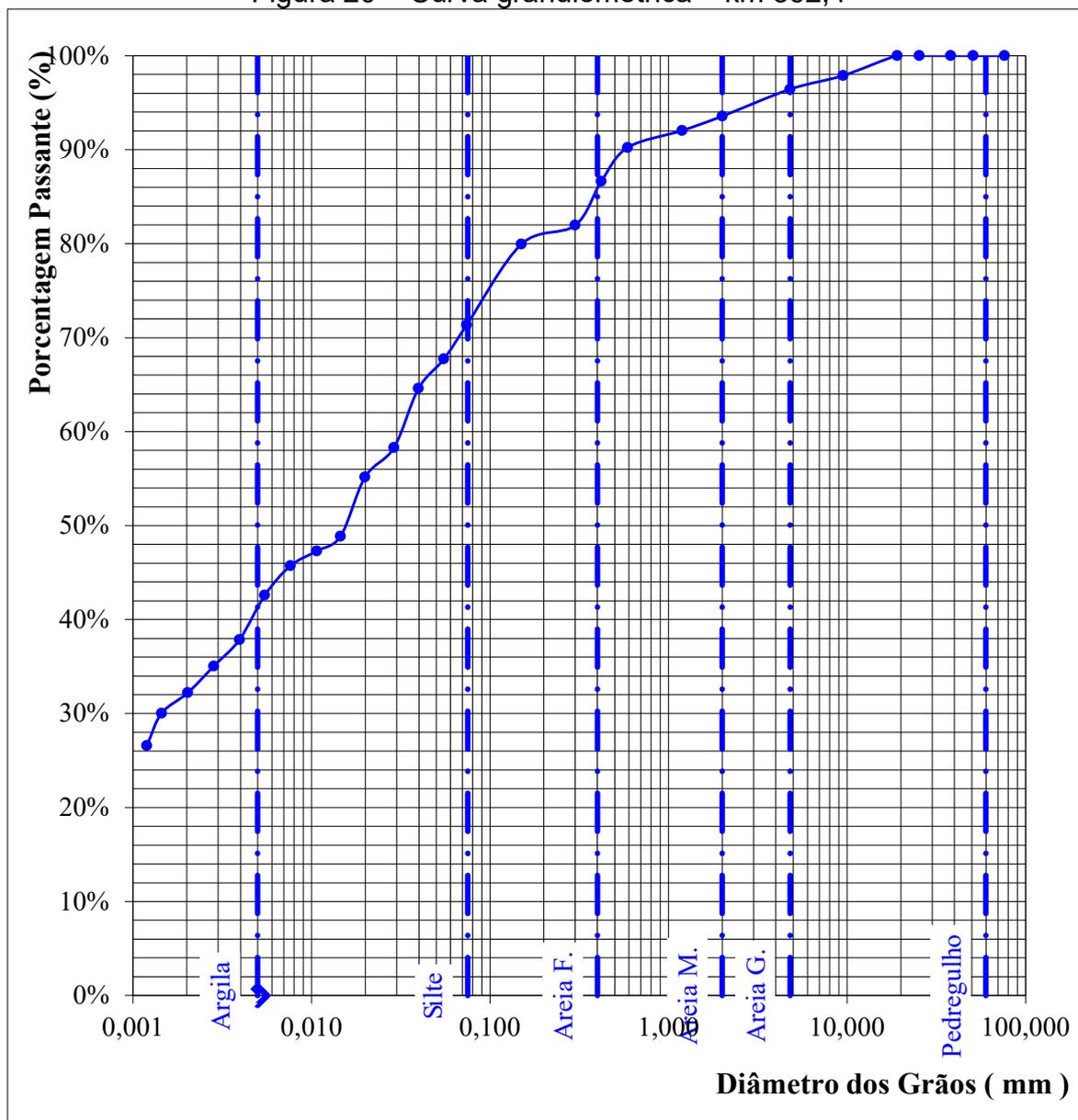
Pode-se, desta forma, constatar a grande variabilidade em termos de classificação, tendo em vista que as dez amostras ensaiadas integram as cinco classificações possíveis para materiais finos, com uma predominância maior (quatro amostras) para a classificação MH ou OH, argila ou silte de alta compressibilidade.

Para análise granulométrica completa foi realizado ensaio de sedimentação, objetivando definir os percentuais de silte e argila da amostra, materiais estes passantes na peneira #200. Este ensaio é baseado nos princípios da Lei de Stokes,

que define que a velocidade de sedimentação em meio aquoso dos dois materiais é diretamente proporcional ao diâmetro da partícula, ou seja, o silte deposita-se mais rapidamente que a argila no fundo da proveta de ensaio.

Após a realização dos dois ensaios de granulometria, peneiramento e sedimentação, obteve-se a curva granulométrica do material (Figura 20).

Figura 20 – Curva granulométrica – km 362,4



4.2 Sondagem mista

Juntamente com a sondagem a trado, a sondagem mista (percussão + rotativa) também foi realizada no dia 24 de abril de 2023. As perfurações foram executadas por percussão, de acordo com a norma vigente NBR 6484/2020, com auxílio de circulação de água e protegidas por um revestimento de 76,2 mm (3") de diâmetro nominal. A extração das amostras foi feita com a cravação de amostrador padrão de 34,9 mm (1 3/8") e 50,8 mm (2") de diâmetro interno e externo, respectivamente.

Quando do impenetrável à percussão, foi realizada sondagem do tipo rotativa, executada por meio de sonda rotativa usando-se coroas de diâmetros BWG.

Nas camadas de rocha foram determinadas as recuperações da mesma, ou seja, a relação expressa em porcentagem entre o comprimento da amostra recuperada e a altura da manobra, assim como o número de fragmentos por metro, sendo considerados como fragmentos apenas aqueles compreendidos entre dois prováveis planos de fraturamento natural de rocha, identificados através dos testemunhos.

As Figuras 21 e 22 mostram a sondagem em execução e a caixa com a recuperação de testemunhos, respectivamente.

No perfil apresentado, Figura 23, constata-se a partir desta a presença de material argiloso, intercalado por material granular pedregulhoso, até a profundidade de 2,50 m. A partir deste ponto a sondagem apresenta rocha alterada. A sondagem por rotativa seguiu até 6,50 m visando a confirmação do tipo de material. O nível freático não foi caracterizado. Com base na recuperação de testemunhos a rocha fragmentada foi classificada como muito resistente (R4) e extremamente fraturada (F4) com índice de recuperação 46% entre de 2,50 a 5,00 m, e de 32% entre 5,00 e 6,50 m. A análise visual da textura da rocha permitiu sua classificação como granito.

Figura 21 – Imagem da sondagem em execução



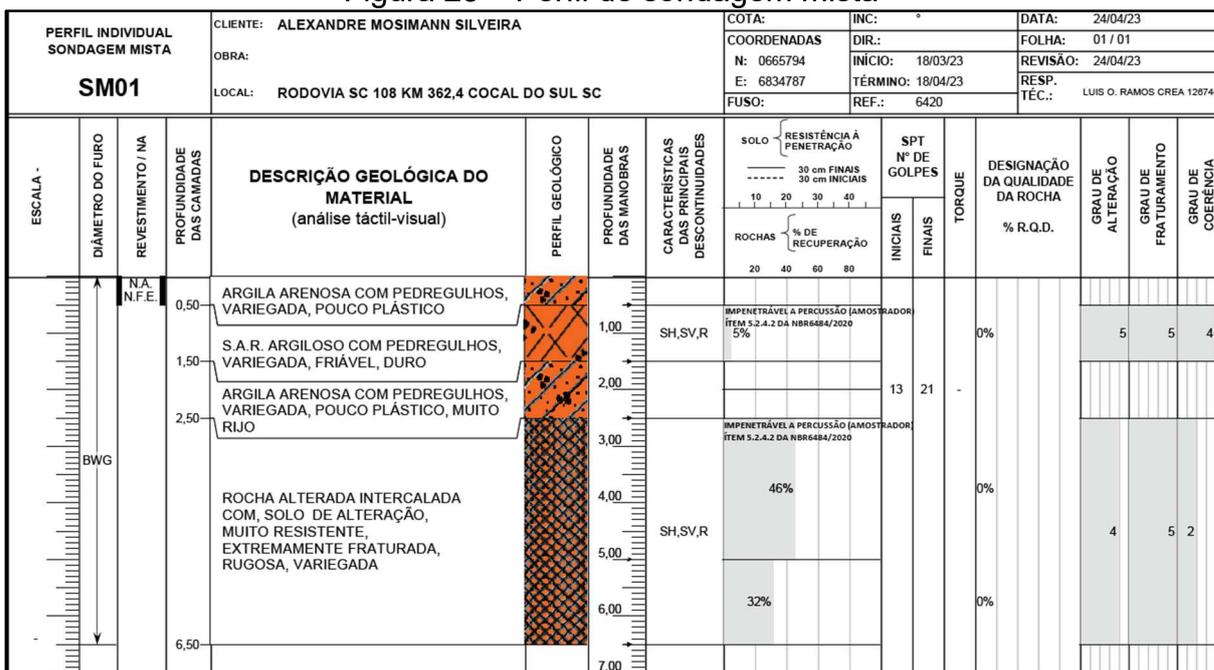
Fonte: Geotec Sondagem

Figura 22 – Imagem da caixa de testemunho



Fonte: Geotec Sondagem

Figura 23 – Perfil de sondagem mista



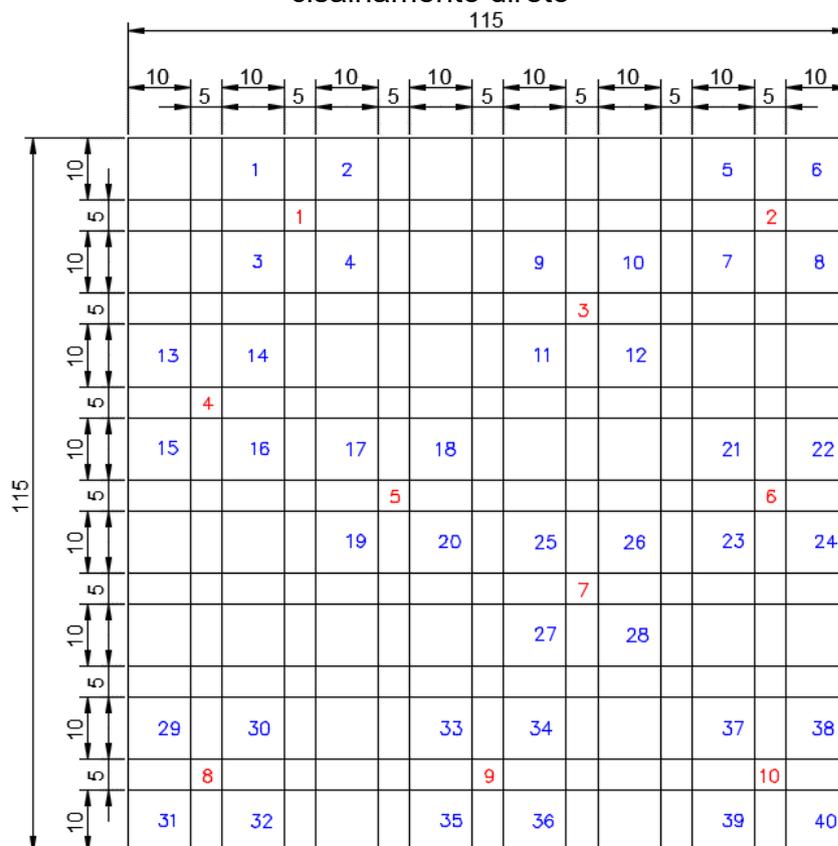
Fonte: Geotec Sondagem

4.3 Amostras para ensaios de cisalhamento direto e análise da variabilidade

A coleta das amostras indeformadas ocorreu nos dias 4 e 5 de maio de 2023. Foram coletadas 40 amostras com dimensões de 0,10 m x 0,10 m x 0,03 m, configurando 40 moldes a serem utilizados em ensaios de cisalhamento direto. Essas 40 amostras foram ensaiadas para a definição de 10 envoltórias de resistência (4 amostras por envoltória). Neste sentido, busca-se a caracterização da variabilidade dos parâmetros de resistência, ângulo de atrito e coesão.

A Figura 24 apresenta planta esquemática para coleta das 40 amostras indeformadas. Os números em azul representam as amostras coletadas e em vermelho os conjuntos de quatro amostras para cada envoltória. As medidas são em centímetros.

Figura 24 – Esquema da coleta das amostras indeformadas para ensaio de cisalhamento direto



As Figuras 25, 26 e 27 apresentam, respectivamente: o posicionamento dos moldes, a moldagem de uma das amostras e o posicionamento final das 40 amostras coletadas para os ensaios de cisalhamento direto.

Figura 25 – Posicionamento dos moldes



Fonte: Nilo Rodrigues

Figura 26 – Moldagem das amostras



Fonte: Nilo Rodrigues

Figura 27 – Posicionamento das 40 amostras coletadas



Fonte: Nilo Rodrigues

A partir da coleta dos corpos de prova de solo estruturado moldados em campo, e mantidos de forma a preservar sua estrutura e umidade, deu-se início à preparação dos mesmos para o ensaio de cisalhamento direto. As amostras foram ensaiadas no laboratório da empresa Similar Engenharia, em Trombudo Central – SC, em prensa de cisalhamento direto OWNTEC modelo MS 101.

O procedimento de ensaios consistiu em: pesagem inicial das amostras; transferência das amostras para a caixa bi-partidada; inundação das amostras por um período de 24hs; aplicação da tensão normal até estabilização; deslocamento relativo da caixa/cisalhamento em velocidade pré-estabelecida. Com o intuito de nortear o leitor e destacar pontos pertinentes para interpretação dos ensaios nos subitens que seguem são descritos em maiores detalhes aspectos pertinentes a preparação dos corpos de prova, a aplicação da tensão normal e verificação do processo de consolidação e por fim a fase de cisalhamento e interpretação.

4.3.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram pesados em balança com precisão de 0,1 g e comunicação direta à planilha eletrônica em computador dedicado à utilização

laboratorial. Tal procedimento garante o registro da massa do corpo de prova sem o risco de falha humana na transcrição dos valores. Como os corpos de prova foram moldados em campo, a massa do molde metálico vazio foi registrada após a transferência do solo para a caixa de cisalhamento. Deste modo, tem-se a massa do molde metálico com solo úmido, e a massa do molde metálico. Por subtração, tem-se a massa do solo úmido, que foi utilizado para o cálculo da densidade natural.

A preparação do ensaio propriamente dito deu-se pela montagem da caixa de cisalhamento e a transferência do corpo de prova para o espaço apropriado na referida caixa. Parafusos espaçadores garantiram o afastamento entre as duas metades da caixa de cisalhamento e parafusos de trava garantiram que as metades não se movam até que seja o momento da ruptura do corpo de prova.

4.3.2 Fase de consolidação e determinação da velocidade de ensaio

Uma vez montada a caixa de cisalhamento com o corpo de prova o conjunto é posicionado na prensa de cisalhamento. Aparatos de transferência de carga e de instrumentação de deformação de força são adequadamente posicionados. Apoiou-se a carga adequada para a tensão normal do referido estágio, inundando-se o recipiente contendo a caixa de cisalhamento com água, dando início a etapa de consolidação.

As tensões normais iniciais foram de 31,53 kPa, 52,55 kPa, 73,56 kPa e 105,09 kPa. Posteriormente essas tensões são corrigidas durante o ensaio uma vez que a área de aplicação de tensão é reduzida em função da deformação do corpo de prova, de modo que a tensão é corrigida em função disso.

Com base na curva de deformação vertical do corpo de prova em função da aplicação da tensão normal, pode-se calcular a velocidade máxima de deformação para garantir que o ensaio ocorra em condições drenadas.

Para análise da velocidade aplicada o corpo de prova 3 foi utilizado pela empresa executante como referência. Neste corpo de prova, após a aplicação da tensão normal e estabilização, foi calculado o coeficiente de adensamento vertical da amostra (c_v), para determinação da velocidade máxima de ensaio seguindo procedimento descrito em ASTM D3080. A norma ASTM D3080 apresenta três métodos distintos para a determinação do tempo mínimo até a falha por cisalhamento.

Dois são calculados a partir da análise do gráfico de consolidação, enquanto o terceiro apresenta velocidades padrão para serem utilizadas de acordo com a classificação do solo, conforme Tabela 10.

Foi calculada a velocidade máxima de cisalhamento em até 0,16 mm/min. A velocidade adotada nos ensaios foi de 0,03 mm/min, o que corresponde a um tempo até a falha de 333 min, se considerada a falha a 10% de deslocamento relativo da caixa com lado de 10,23cm.

Tabela 10 – Valores padrão por norma

Classificação USCS (ASTM D2487)	Tempo de falha
SW, SP (<5% finos)	10 minutos
SW-SW, SP_SM, SM (>5% finos)	60 minutos
SC, ML, CL, SP-SC	200 minutos
MH, CH	24 horas

Observando que a Tabela 10 indica um tempo de falha de 200 minutos para classificação de solo nos grupos SC, ML, CL, SP-SC e 24 horas para os grupos MH, CH realizou-se um conjunto de ensaios complementares no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina (LMS–UFSC), com o intuito de verificar a classificação do solo local e também realizar campanha complementar de ensaios de cisalhamento. O conjunto de ensaios complementares foi realizado a partir de um bloco indeformado coletado próximo a região de coleta das 40 amostras apresentadas na Figura 28.

Figura 28 – Coleta do bloco indeformado



Fonte: Nilo Rodrigues

De posse dos resultados dos ensaios complementares foram calculadas as velocidades até a falha considerando as fases de consolidação dos ensaios. Foram ensaiadas 6 amostras, nas tensões normais de 30, 50 e 100 kPa, duas amostras em cada tensão normal.

Para a definição da velocidade do ensaio utilizou-se o trabalho desenvolvido por Gibson e Henkel (1954), cujas fórmulas estão apresentadas nas Equações 14 e 15. Observa-se que na equação 15 um deslocamento de 10mm foi considerado para determinação do tempo até a falha, de acordo com recomendação da ASTM D3080 quando não há disponibilidade da curva tensão deformação da fase de cisalhamento.

$$t_f = 12,7 \times t_{100} \quad (14)$$

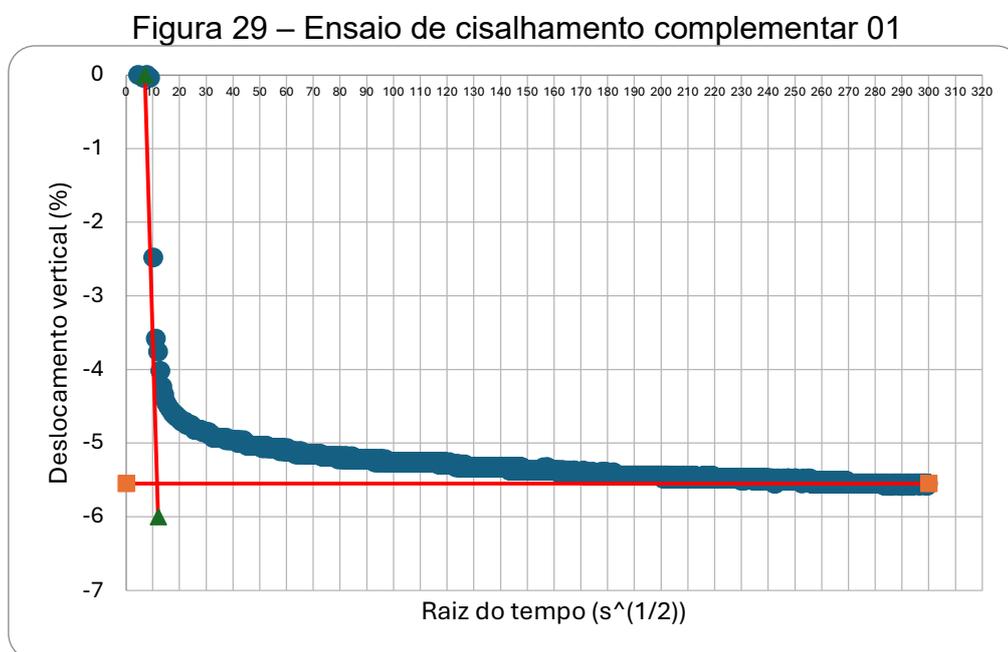
$$v = \frac{10mm}{t_f} \quad (15)$$

Sendo:

- t_f = tempo até a ruptura (em segundos);
- t_{100} = tempo necessário até a falha para condição drenada (em segundos);
- v = velocidade para execução do ensaio (em mm/min).

O valor de t_{100} é definido a partir da fase de consolidação quando então traça-se a curva de deslocamento vertical (%) pela raiz quadrada do tempo (s). A partir desta curva traça-se uma linha tangente à porção reta inicial da curva. Esta linha é estendida até a interseção com a linha horizontal que representa 100% da consolidação. Este ponto de interseção representa a raiz quadrada de t_{100} .

A Figura 29 apresenta o ensaio de cisalhamento complementar 01 na tensão normal de 50 kPa, cuja tempo t_{100} determinado foi de 135,1 segundos, resultando em uma velocidade máxima até a falha de 0,35 mm/min. Os demais gráficos de interpretação encontram-se no apêndice A.



A Tabela 11 apresenta o resumo dos cálculos efetuados para cada ensaio para determinação da velocidade máxima do ensaio para garantia da condição drenada. Verifica-se que as velocidades requeridas variaram de 0,35 a 1,89 mm/min, superiores as caracterizadas inicialmente para as 40 amostras ensaiadas. No entanto, dá-se preferência para a realização dos ensaios em velocidades mais lentas, visto as incertezas associadas a determinação de t_{100} .

Tabela 11 – Resumo dos cálculos para definição da velocidade

Item	Ensaio de cisalhamento					
	1	2	3	4	5	6
Raiz quadrada de t_{100} (s)	11,63	7,89	10,66	4,99	9,87	7,63
t_{100} (s)	135,14	62,18	113,60	24,93	97,48	58,22
t_f (s)	1.716,29	789,72	1.442,70	316,65	1.237,98	739,35
t_f (min.)	28,60	13,16	24,04	5,28	20,63	12,32
Velocidade (mm/min)	0,35	0,76	0,42	1,89	0,48	0,81

Após a estabilização das deformações verticais, procedeu-se com o início do cisalhamento dos corpos de prova. Para tal, foram retirados os parafusos “trava” e afastados os parafusos espaçadores. Nesse momento as metades da caixa de cisalhamento permaneceram afastadas devido ao atrito do solo com a parede interna da caixa. A deformação controlada do corpo de prova foi iniciada, à velocidade constante, e registraram-se as deformações horizontais e verticais, além da força necessária para movimentar uma porção da caixa de cisalhamento em relação a outra. Da força medida, calculou-se a tensão cisalhante. A tensão normal foi obtida pela força vertical aplicada sobre o corpo de prova, em função de sua área. Considerou-se a área do corpo de prova corrigida em função de sua deformação.

Ao final do estágio de ruptura, tem-se os dados coletados durante o processo, e pode-se traçar a curva de tensão cisalhante versus deformação horizontal. A partir dessa, definiu-se o ponto de ruptura do corpo de prova, sendo adotado como par coordenado (tensão cisalhante x tensão normal) para a formação da envoltória de ruptura.

As Figuras 30 e 31 apresentam a pesagem da amostra no molde e a caixa bipartida utilizada no ensaio, respectivamente.

Figura 30 – Pesagem da amostra



Fonte: Vitor Muller

Figura 31 – Caixa bipartida



Fonte: Vitor Muller

As 40 amostras utilizadas para caracterização da variabilidade foram ensaiadas na velocidade de 0,03 mm/min, conforme descrito. Já os ensaios complementares realizados em campanha posterior no LMS/UFSC, foram realizados em dois conjuntos distintos de velocidade: velocidade A - 0,3 mm/min (CP 01, 02 e 03) e velocidade B - 0,06 mm/min (CP 04, 05 e 06). Os resultados da campanha complementar não foram utilizados para caracterização estatística, somente serão apresentados como validação de parâmetros.

4.4 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e interpretação de parâmetros estatísticos básicos

Um resultado típico da evolução das tensões e deformações durante o ensaio de cisalhamento direto é apresentado na Figura 32, representativo da região central da área investigada, região denominada como 5. Observa-se através do resultado uma tendência de estabilização da tensão cisalhante para a amostra com tensão normal de 50 kPa. A amostra cisalhada a tensão normal 30 kPa apresentou uma tendência de pico seguida de queda da tensão cisalhante. As amostras cisalhadas a 70 e 100 kPa de confinante apresentaram uma tendência a crescimento contínuo das tensões.

Em relação aos deslocamentos verticais, com exceção a amostra com tensão normal de 30 kPa, foi caracterizada tendência compressiva, resultado típico de amostras de solo residual submetidas a cisalhamento onde a estrutura do residual não permite a caracterização clara de comportamento puramente contrátil (tendência a estabilização da tensão cisalhante e da deformação de compressão sem apresentar

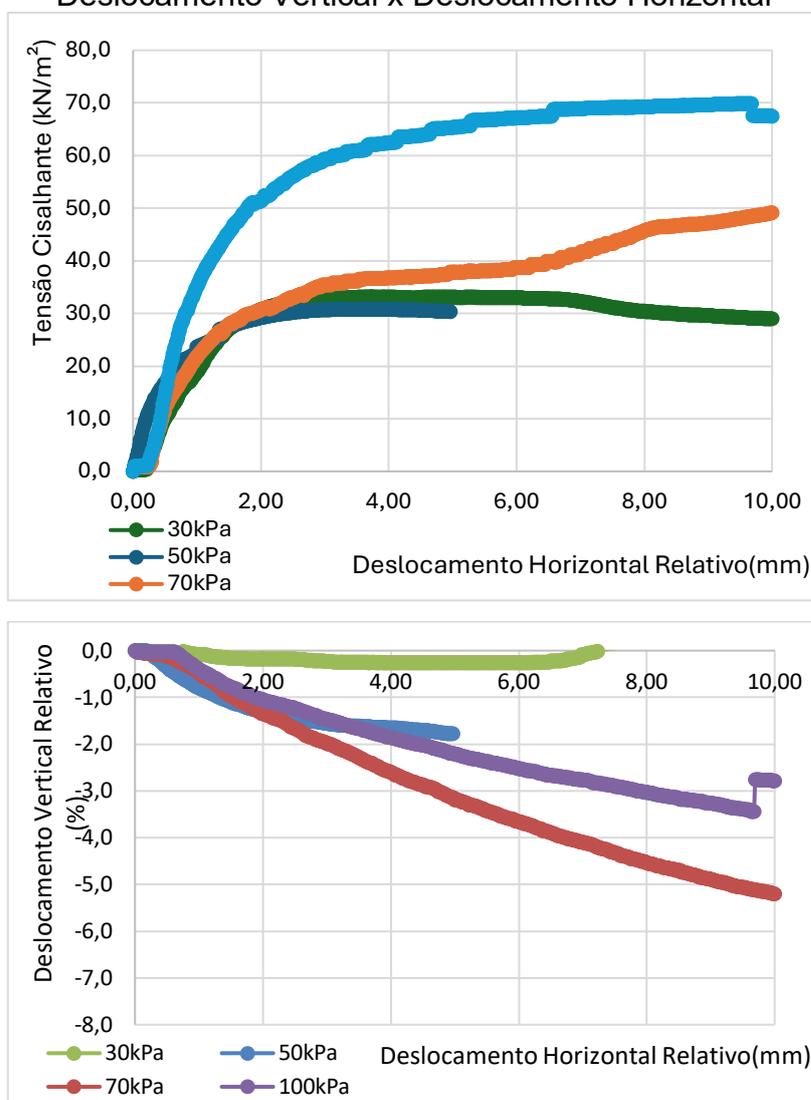
pico nas curvas) e dilatante (tendência de pico na tensão cisalhante e deformação expansiva durante o cisalhamento), de acordo com o também observado por Futai (2002), conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Resumo da resistência ao cisalhamento

	Solos residuais jovens e saprolíticos	Solos coluvionares, residual maduro e lateríticos
Pico de resistência	Apresentam pico	Não apresenta pico, em geral
Envoltória	Depende do índice de estruturação	Depende do índice de estruturação
Envoltória curva	Trecho curvo chega a níveis de tensões de até 500 kPa	Envoltória linear pode ser ajustada dentro da faixa de uso da engenharia

Fonte: Futai (2002)

Figura 32 – Gráficos do 5º conjunto: Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal, Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal



Na Figura 33 é apresentada a envoltória de ruptura obtida para o conjunto 5, região central da coleta de amostras. A envoltória foi obtida através dos valores máximos de tensão cisalhante de cada ensaio (valores de pico). Observa-se que para o conjunto apresentado os valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo foram de $24,8^\circ$ e $11,6\text{kN/m}^2$. Para simplificação de leitura, a partir deste ponto, intercepto coesivo será chamado de coesão.

No Anexo A são apresentados os gráficos da evolução das tensões e a interpretação das envoltórias para o conjunto completo de resultados, ou seja, dados originais e envoltórias caracterizadas para os dez conjuntos de ensaios.

Um resumo das envoltórias caracterizadas pode ser observado na Figura 34 com resultados apresentados na Tabela 13, da qual observa-se a variabilidade obtida nos ensaios. Nesta tabela são apresentados os resultados de coesão efetiva (em kN/m^2) e ângulo de atrito efetivo (em graus) para cada envoltória, além dos valores mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação.

Figura 33 – Envoltória de cisalhamento – amostras da região 5

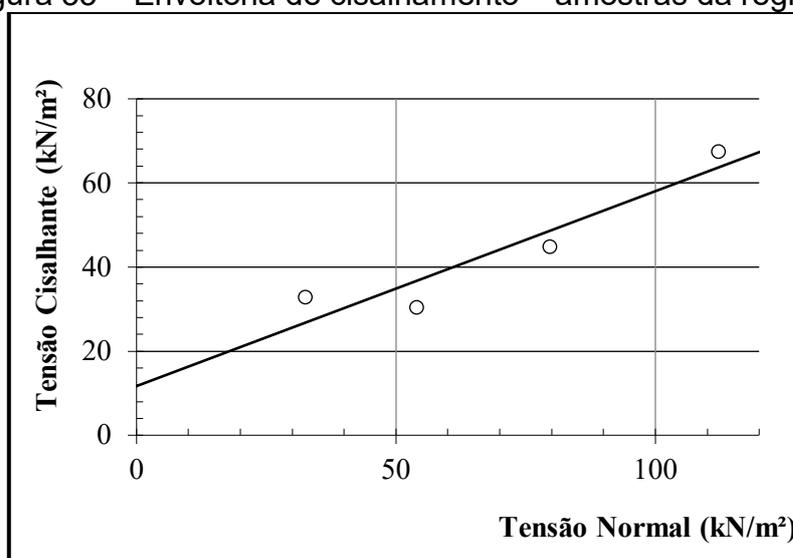


Figura 34 – Envoltórias de cisalhamento obtidas considerando os 10 conjuntos de CPs avaliados

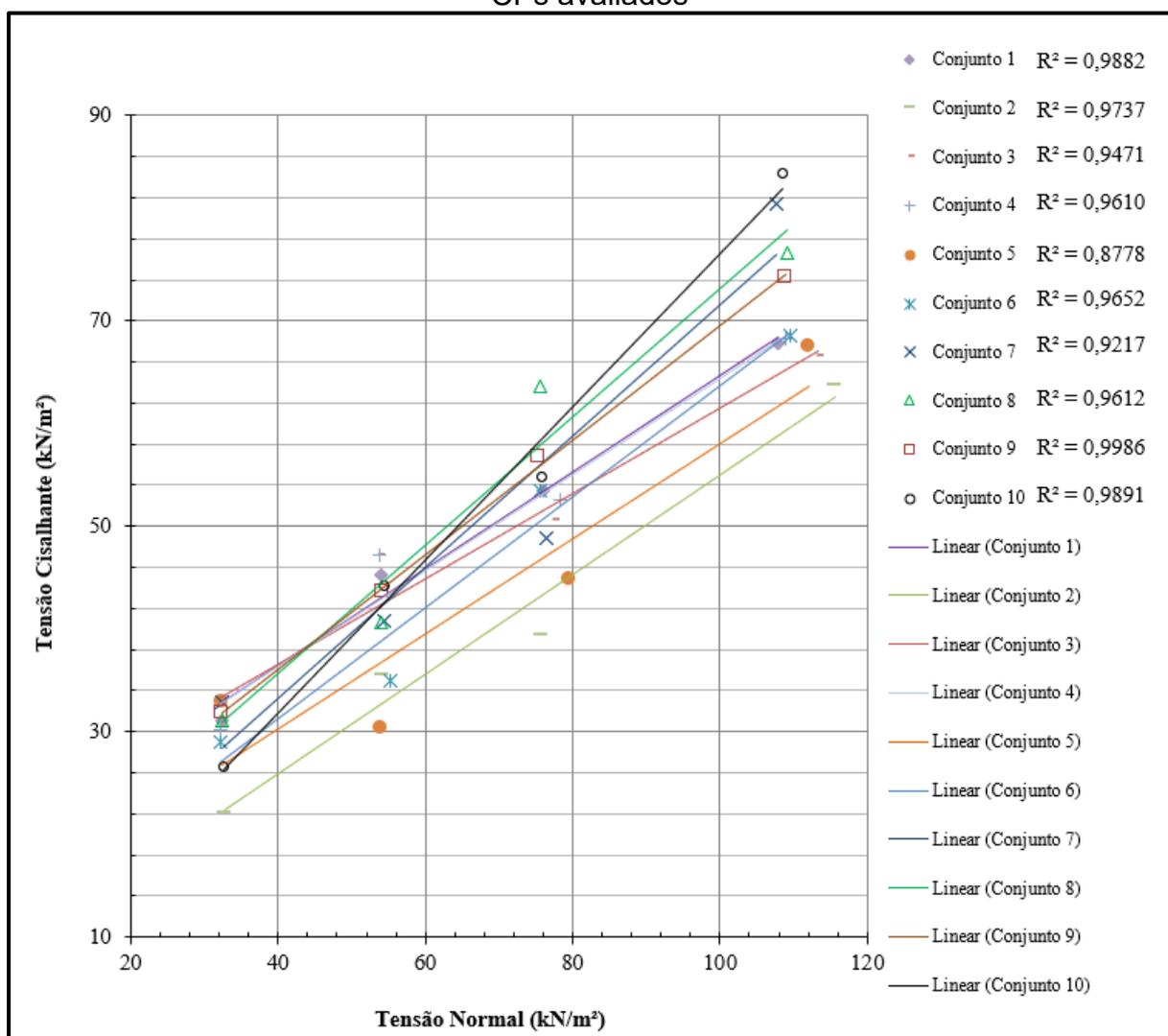


Tabela 13 – Resumo dos resultados

Parâmetro	Envoltória										Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	COV
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
c' (kN/m ²)	17,5	6,5	20,0	17,6	11,6	9,7	7,6	10,7	13,8	2,0	2,0	20,0	11,7	5,6	48,1%
ϕ' (graus)	25,2	25,8	22,5	25,0	24,8	28,3	32,5	31,9	29,1	36,6	22,5	36,6	28,2	4,4	15,5%

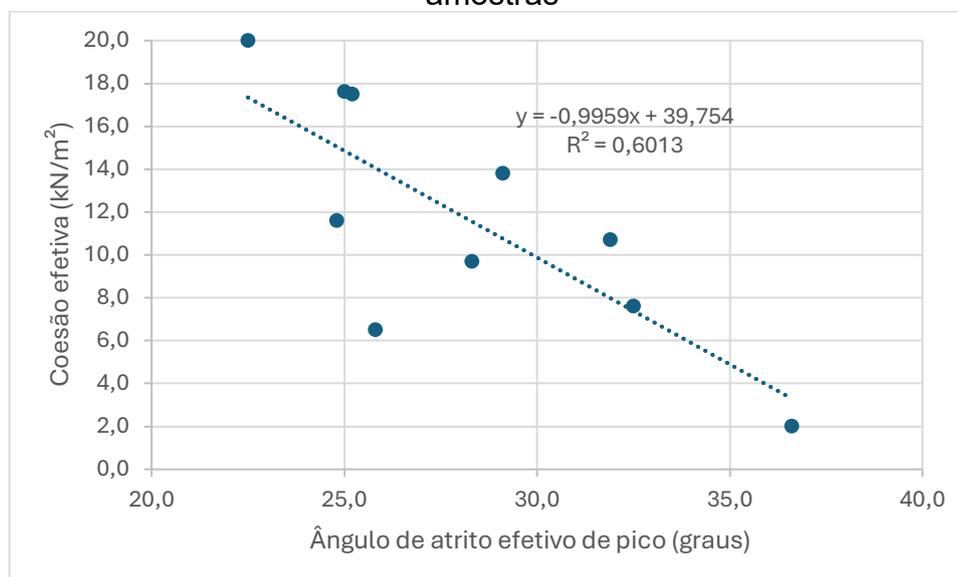
Observa-se, pelos resultados acima apresentados, que os valores de coesão efetiva variaram entre 2,0 e 20,0 kN/m², com uma média de 11,7 kN/m², desvio padrão de 5,6 kN/m² o que resulta em um coeficiente de variação de 48,1%.

Para o ângulo de atrito efetivo os valores variaram entre 22,5 e 36,6 graus, com uma média de 28,2°, desvio padrão de 4,4° e coeficiente de variação de 15,5%. Constata-se um valor bem superior de coeficiente de variação de coesão efetiva em

relação ao ângulo de atrito efetivo, fato este também constatado por Campello et al. (2019) e Lacasse e Nadim (1998), entre outros.

Tomando-se como base os resultados de coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo de pico para os dez conjuntos de quatro amostras cada, percebe-se, conforme Figura 35, que há uma tendência de diminuição do valor da coesão efetiva com o aumento do ângulo de atrito de pico, demonstrando a interdependência entre os dois parâmetros. Se o valor da coesão for superestimado, o valor do ângulo de atrito deverá ser subestimado, e vice-versa.

Figura 35 – Coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo de pico para o conjunto de amostras



Entretanto, deve-se atentar para algumas exceções, também identificadas por Branco (2014). Nota-se que três conjuntos com ângulo de atrito efetivo na ordem de 25°, possuem variações de coesão efetiva de até 11 kN/m². De forma análoga, para coesões efetivas entre 11 e 12 kN/m² a variação do ângulo de atrito efetivo foi de 7°.

Complementando a análise da variabilidade da resistência em uma análise similar a adotado por Branco (2014), fez-se a caracterização do ângulo de atrito efetivo secante. De acordo com Bolton (1986), o ângulo de atrito efetivo secante, que é interpretado como a normalização da resistência ao cisalhamento, trata-se da relação entre a resistência ao cisalhamento e a tensão normal à que está sujeito. O critério de cisalhamento de Mohr-Coulomb é baseado na coesão efetiva e no ângulo de atrito efetivo de pico, entretanto o ângulo de atrito efetivo varia com a tensão de

confinamento. Desta forma, como opção para a consideração da coesão e do ângulo de atrito tangente que caracterize a resistência ao cisalhamento de um solo, considera-se a possibilidade de se utilizar apenas o ângulo de atrito secante. Com isso, desde que conhecida a tensão de confinamento, pode-se caracterizar a resistência ao cisalhamento a partir deste único parâmetro. As Figuras 36 e 37 apresentam os gráficos normalizados para o conjunto 5, região central das coletas, para as diversas tensões aplicadas com ilustração da determinação do ângulo de atrito secante.

Figura 36 – Gráficos normalizados do conjunto 5: (a) 30kPa (b) 50kPa

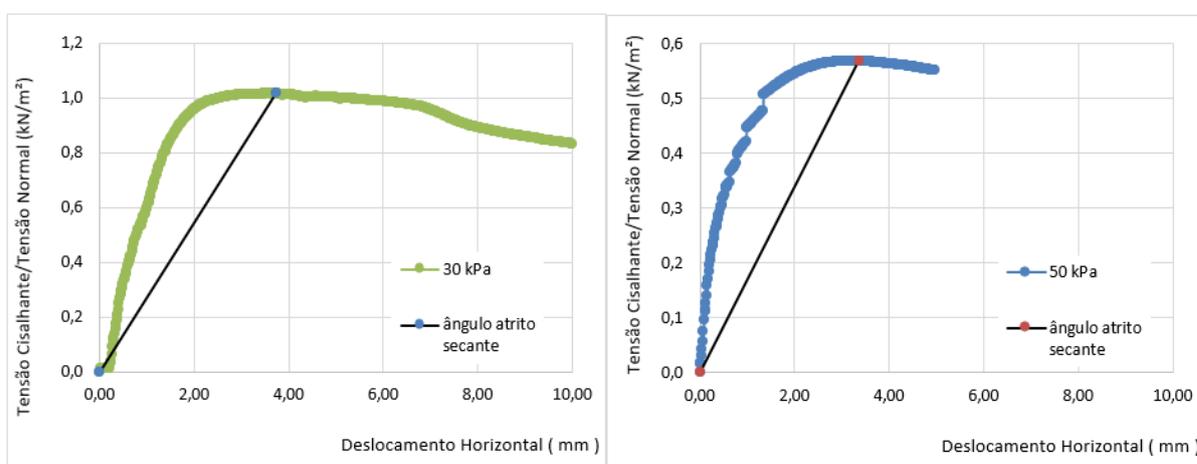
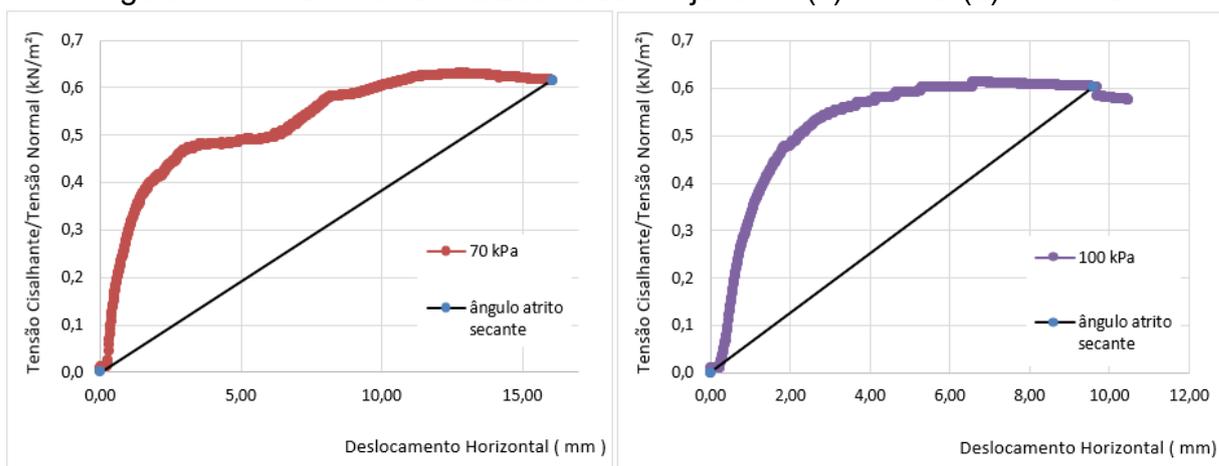


Figura 37 – Gráficos normalizados do conjunto 5: (c) 70 kPa (d) 100 kPa



A Tabela 14 apresenta os resultados de ângulo de atrito efetivo da secante do pico.

Tabela 14 – Resultados do ângulo de atrito efetivo – secante do pico

Amostra	Estágio	Deformação Horizontal (%)	Tensão Normal (kN/m ²)	Tensão Cisalhante (kN/m ²)	ϕ (°)	ϕ médio (°)
A1	E1	2,73	32,38	31,41	44,1	38,0
	E2	2,75	53,98	45,40	40,1	
	E3	6,85	78,77	54,71	34,8	
	E4	9,50	115,71	75,49	33,1	
A2	E1	6,43	33,62	23,31	34,7	31,1
	E2	3,91	54,61	36,56	33,8	
	E3	8,68	80,30	40,47	26,8	
	E4	12,99	120,17	66,52	29,0	
A3	E1	4,74	33,04	30,99	43,2	39,1
	E2	2,51	53,85	47,85	41,6	
	E3	2,49	53,84	47,85	41,6	
	E4	14,82	122,65	70,96	30,1	
A4	E1	2,62	32,35	30,99	43,8	38,0
	E2	2,49	53,84	47,85	41,6	
	E3	8,15	79,85	54,20	34,2	
	E4	4,56	109,94	70,13	32,5	
A5	E1	3,73	32,71	33,24	45,5	34,5
	E2	3,36	54,31	30,91	29,6	
	E3	16,06	87,07	53,63	31,6	
	E4	9,60	115,83	69,94	31,1	
A6	E1	2,22	32,22	29,21	42,2	35,6
	E2	9,90	58,10	36,72	32,3	
	E3	2,86	75,65	53,58	35,3	
	E4	4,56	109,94	70,13	32,5	
A7	E1	3,73	32,71	33,24	45,5	38,1
	E2	4,03	54,68	41,10	36,9	
	E3	4,37	76,81	49,30	32,7	
	E4	2,76	107,98	82,35	37,3	
A8	E1	3,54	32,64	31,81	44,3	39,2
	E2	3,13	54,19	41,31	37,3	
	E3	4,28	76,73	64,58	40,1	
	E4	5,77	111,30	78,51	35,2	
A9	E1	2,94	32,45	31,97	44,6	39,1
	E2	4,20	54,77	44,50	39,1	
	E3	2,62	75,47	57,28	37,2	
	E4	10,11	116,47	83,19	35,5	
A10	E1	4,66	33,01	26,97	39,2	38,2
	E2	3,44	54,35	44,53	39,3	
	E3	5,59	77,77	56,58	36,0	
	E4	3,60	108,88	85,06	38,0	
Valor máximo (°)						39,2

Amostra	Estágio	Deformação Horizontal (%)	Tensão Normal (kN/m ²)	Tensão Cisalhante (kN/m ²)	φ (°)	φ médio (°)
Valor mínimo (°)						31,1
Média (°)						37,1
Desvio padrão (°)						2,6
COV (%)						7,1

Os resultados apresentam uma menor variabilidade, se comparados com os valores apresentados para o ângulo de atrito efetivo da Tabela 13. Neste caso, a diferença entre os valores máximos e mínimos, que é de 14,1 graus para o ângulo de atrito efetivo, reduziu para 8,1 graus para o ângulo de atrito efetivo da secante.

A Figura 38 apresenta os resultados do ângulo de atrito secante do pico, para cada uma das amostras coletadas, e a Figura 39 mostra os valores médios para cada uma das envoltórias.

Figura 38 – Mapa de variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico

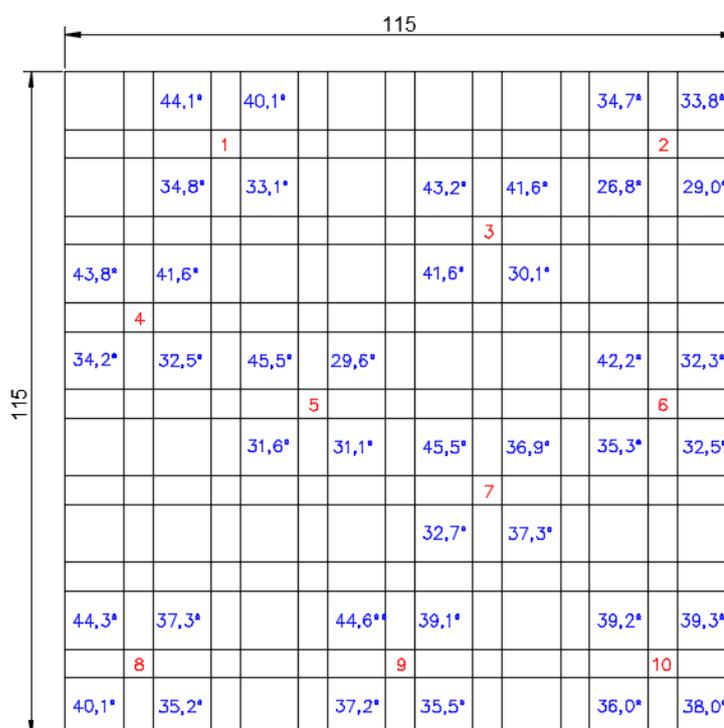
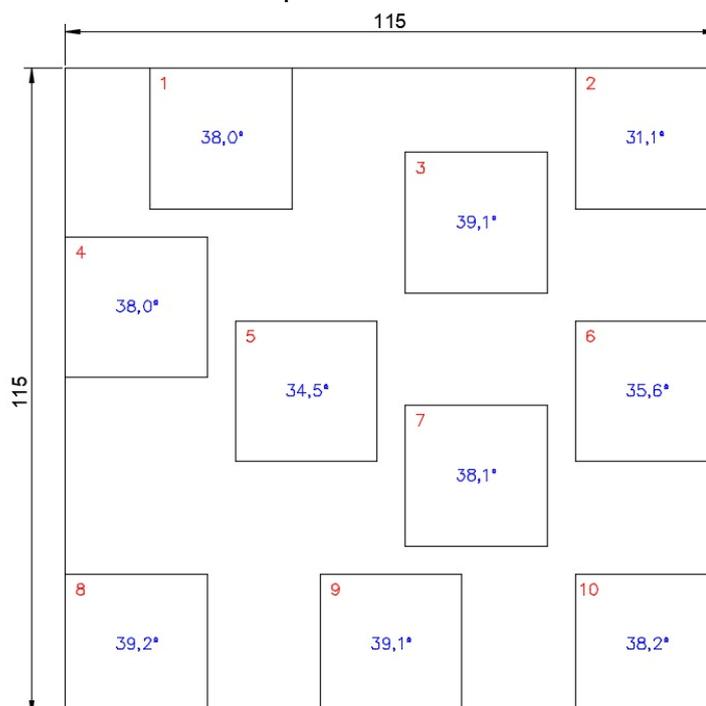


Figura 39 – Mapa de variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio



Complementa a análise da estatística básica a interpretação dos valores de massa específica natural obtida para as diferentes amostras. No total foram considerados os 40 resultados provenientes dos corpos de prova utilizados para ensaio de cisalhamento direto.

A Tabela 15 apresenta o compilado de valores da massa específica natural, em g/cm^3 , que resultaram em um valor médio de $1,785 \text{ g/cm}^3$, com desvio de $0,1 \text{ g/cm}^3$ e COV de 4,6%.

Tabela 15 – Resumo dos resultados

Parâmetro	Resultado									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ynat	1,83	1,84	1,80	1,75	1,73	1,68	1,71	1,67	1,72	1,87
Amostra	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ynat	1,69	1,7	1,84	1,85	1,78	1,9	-	1,83	1,56	1,7
Amostra	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ynat	1,75	1,77	1,75	1,77	1,76	1,76	1,73	1,85	1,78	1,83
Amostra	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ynat	1,82	1,81	1,74	1,88	1,85	1,82	1,88	1,78	2,05	1,79
Valor mínimo (g/cm³)									1,560	
Valor máximo (g/cm³)									2,050	
Média (g/cm³)									1,785	
Desvio padrão (g/cm³)									0,082	
COV (%)									4,62	

4.4.1 Escala de flutuação

Para a definição das escalas de flutuação horizontal foram estabelecidos conjuntos de envoltórias, configurando-se alinhamentos, unindo-se os respectivos centros geométricos para definição de distâncias horizontais. Dessa forma pode-se aplicar o Método Expedito de Vanmarke.

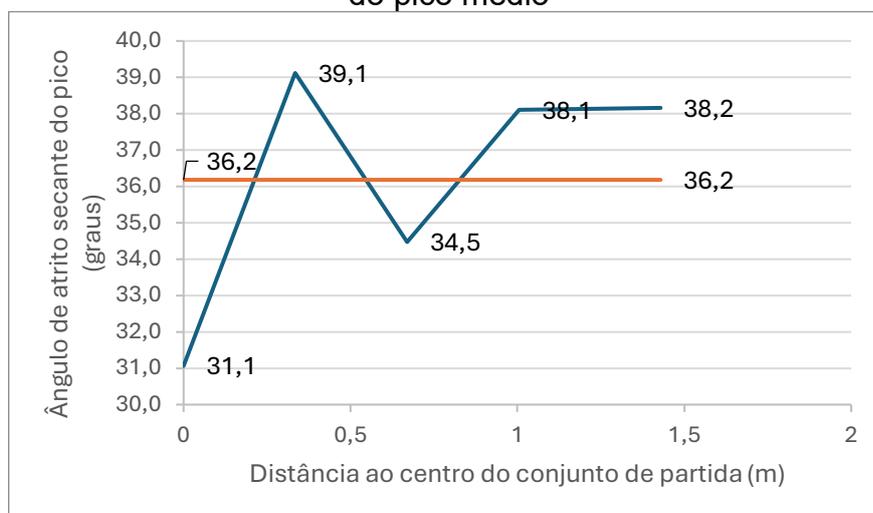
Foram configurados 3 (três) alinhamentos de envoltórias. Alinhamento 1: envoltórias 2, 3, 5, 7 e 10;

- Alinhamento 2: envoltórias 1, 3, 6, 7, 9, e 8;
- Alinhamento 3: envoltórias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

Os alinhamentos 1 e 2 foram definidos pelo menor distanciamento possível entre os pontos. Já o alinhamento 3 objetivou unir todas os pontos coletados.

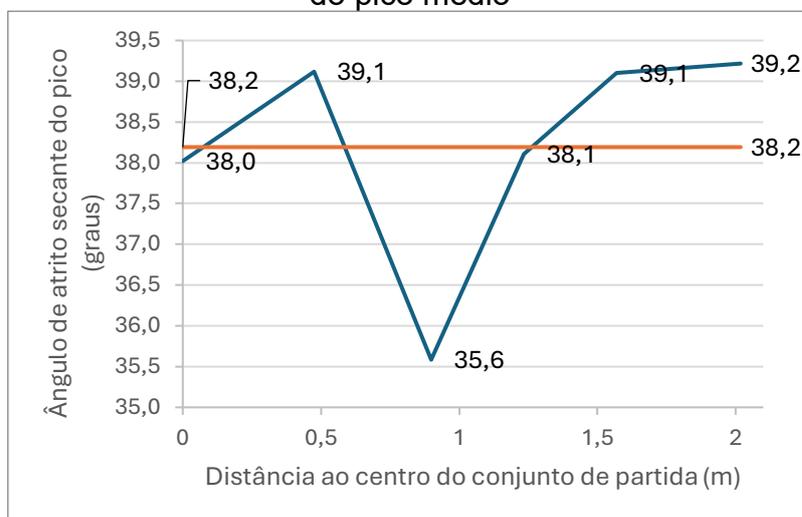
A Figura 40 apresenta o gráfico dos valores individuais pela distância ao centro do conjunto formado pelas envoltórias 2, 3, 5, 7 e 10 (alinhamento 1).

Figura 40 – Alinhamento 1: variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio



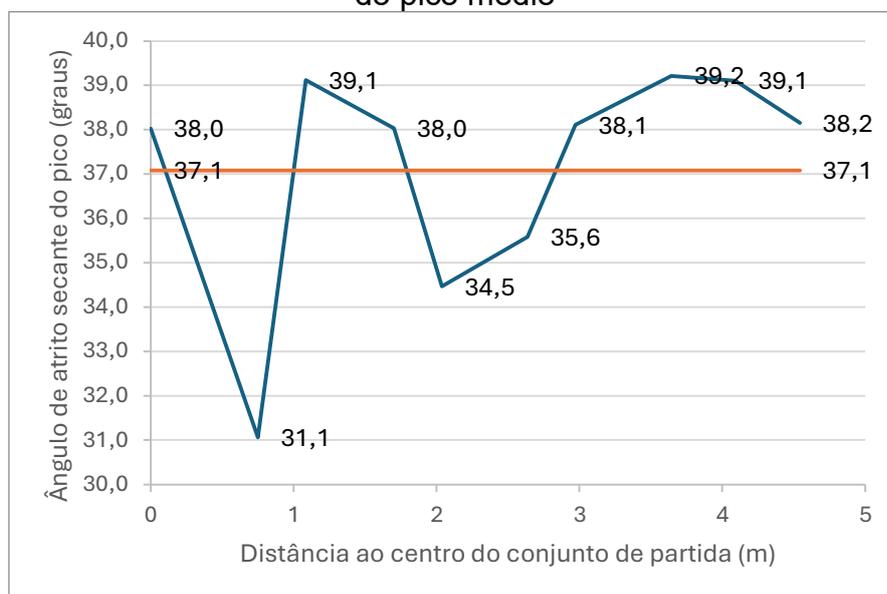
A seguir apresenta-se a Figura 41, representando o gráfico formado pelas envoltórias 1, 3, 6, 7, 9 e 8 (alinhamento 2).

Figura 41 – Alinhamento 2: variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio



E por fim, a seguir é apresentada a Figura 42, representando o gráfico formado pelas envoltórias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 (alinhamento 3).

Figura 42 – Alinhamento 3: variabilidade espacial do ângulo de atrito efetivo secante do pico médio



A Tabela 16 demonstra as distâncias entre as interseções formadas pelas retas que unem as envoltórias de cada alinhamento, a média dos conjuntos e o valor da escala de flutuação horizontal, conforme Equação 9, através da qual observa-se que escalas de flutuação horizontal de 0,25 a 0,73 m foram caracterizadas para os diferentes alinhamentos.

Tabela 16 – Resumo das escalas de flutuação horizontais

Alinhamento	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	$d_{\text{médio}}$ (m)	δ (m)
1	0,33	0,28	-	0,31	0,25
2	0,51	0,68	-	0,59	0,48
3	0,95	0,74	1,05	0,91	0,73

4.4.2 Análise de aderência a função densidade de probabilidade

A análise de aderência a FDP foi realizada através de rotina de cálculo desenvolvida no software R. O software apresenta um pacote de códigos prontos para representação tanto das funções teóricas como para cálculo dos testes de hipótese. A estimação das distribuições teóricas foi realizada pelo método da estimação por máxima verossimilhança (MLE, do inglês maximum-likelihood estimation). Foram também plotados os gráficos Q-Q, representação dos quanties dos dados reais versus

quantis teóricos. A análise de aderência através da representação dos gráficos Q-Q é feita observando a distância dos pontos da linha com inclinação 1:1 a qual representa a equivalência perfeita entre modelo e dado experimental. Em relação aos testes de hipótese foram considerados os testes de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling.

A Tabela 17 apresenta os resultados dos testes de hipótese, para cada parâmetro avaliado. Foi considerado um nível de significância de 95%, ou seja, $\alpha = 0,05$. Observa-se na tabela que além dos valores de pico, foram também avaliadas as distribuições de parâmetros obtidos na condição última (último ponto da curva de cisalhamento de cada ensaio) e na condição de mínimos (mínimo valor de tensão cisalhante após crescimento seguido de queda e ou estabilização).

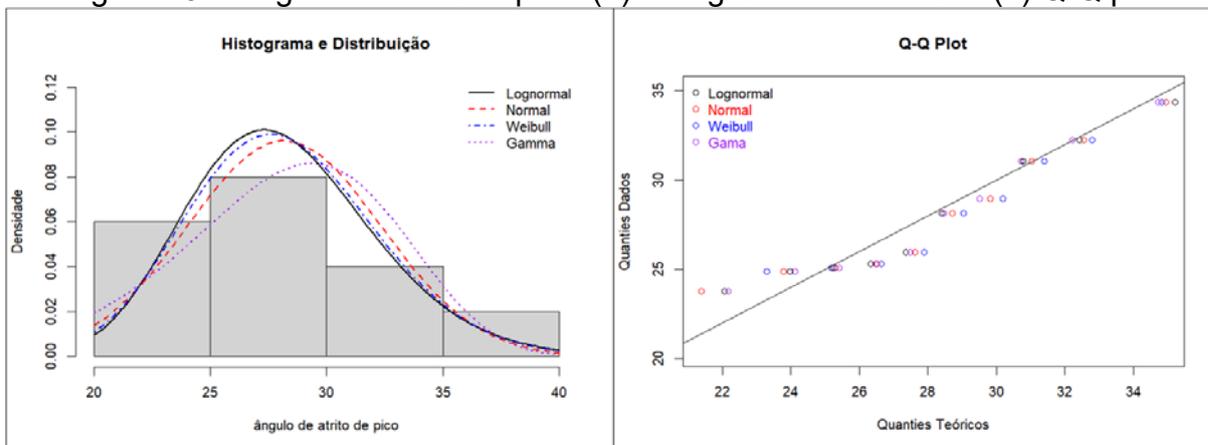
Tabela 17 – Resultados dos testes de hipótese

Parâmetros	Teste de Normalidade	α - significância	p-value	Estatística do teste	Rejeitar a Hipótese H0
ângulo de atrito de pico	Shapiro-Wilk	0.05	0.4639	0.93161	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.3785	0.35713	NÃO
coesão através dos dados de pico	Shapiro-Wilk	0.05	0.9136	0.9725	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.8995	0.17303	NÃO
ângulo de atrito valores últimos	Shapiro-Wilk	0.05	0.8597	0.9668	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.9334	0.15488	NÃO
coesão através dos valores últimos	Shapiro-Wilk	0.05	0.01497	0.80115	SIM
	Anderson-Darling	0.05	0.009508	0.95276	SIM
ângulo de atrito valores mínimos	Shapiro-Wilk	0.05	0.3661	0.92109	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.235	0.43635	NÃO
coesão através dos valores mínimos	Shapiro-Wilk	0.05	0.09193	0.86688	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.1175	0.54586	NÃO
ângulo de atrito secante	Shapiro-Wilk	0.05	0.3707	0.97041	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.5128	0.32454	NÃO
peso específico	Shapiro-Wilk	0.05	0.1599	0.95858	NÃO
	Anderson-Darling	0.05	0.3928	0.3772	NÃO

Verifica-se, de acordo com a tabela, que apenas os valores de coesão determinados considerando os valores últimos das resistências mobilizadas rejeitam a hipótese H0, ou seja, não há evidências que estes dados podem ser representados por uma função normal. Em todas as demais análises não há evidências para rejeitar a representatividade da função normal. Essas observações são corroboradas com as figuras a seguir 41 a 48. (Figura 43 para o ângulo de atrito de pico, Figura 44 para a coesão de pico, Figura 45 para o ângulo de atrito último, Figura 46 para a coesão última, Figura 47 para o ângulo de atrito mínimo, Figura 48 para a coesão mínima,

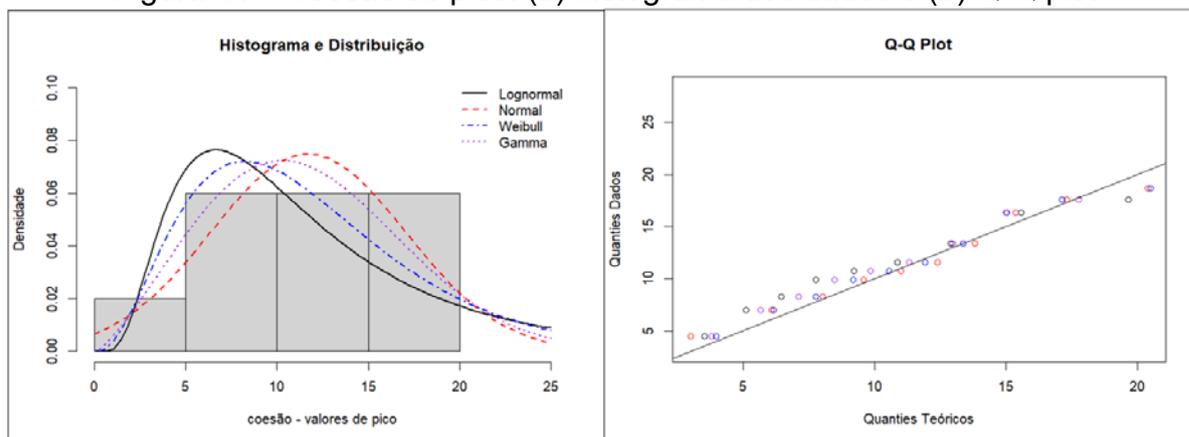
Figura 49 para o ângulo de atrito secante e Figura 50 para a massa específica) sendo também representados os gráficos Q-Qs, distribuição de quantis amostrais e teóricos.

Figura 43 – Ângulo de atrito de pico: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



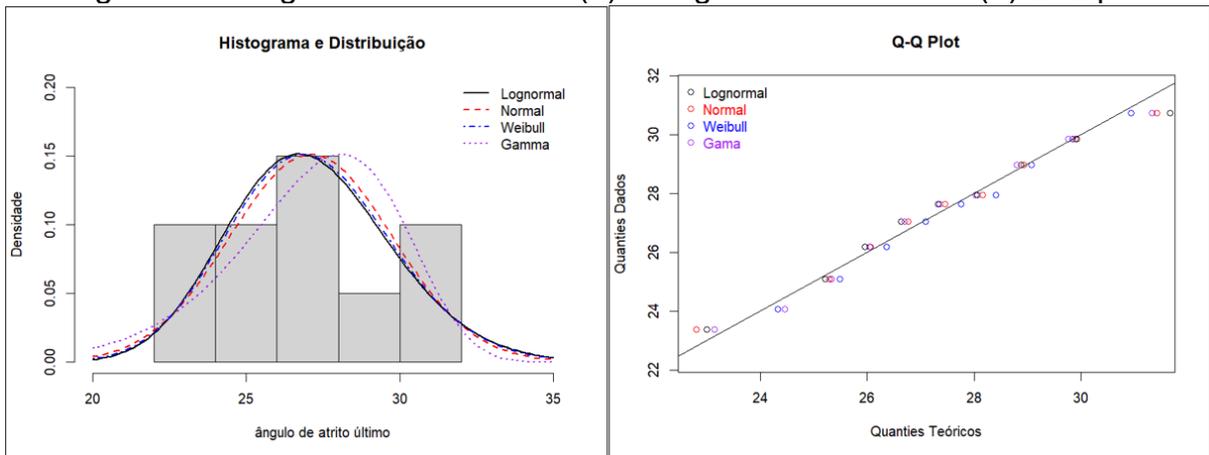
Conforme Figura 43 o histograma demonstra o atendimento ao critério para as funções normal, lognormal e Weibull, com a função Gamma não sendo bem representativa. O gráfico Q-Q Plot demonstra uma leve dispersão dos valores em relação à reta.

Figura 44 – Coesão de pico: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



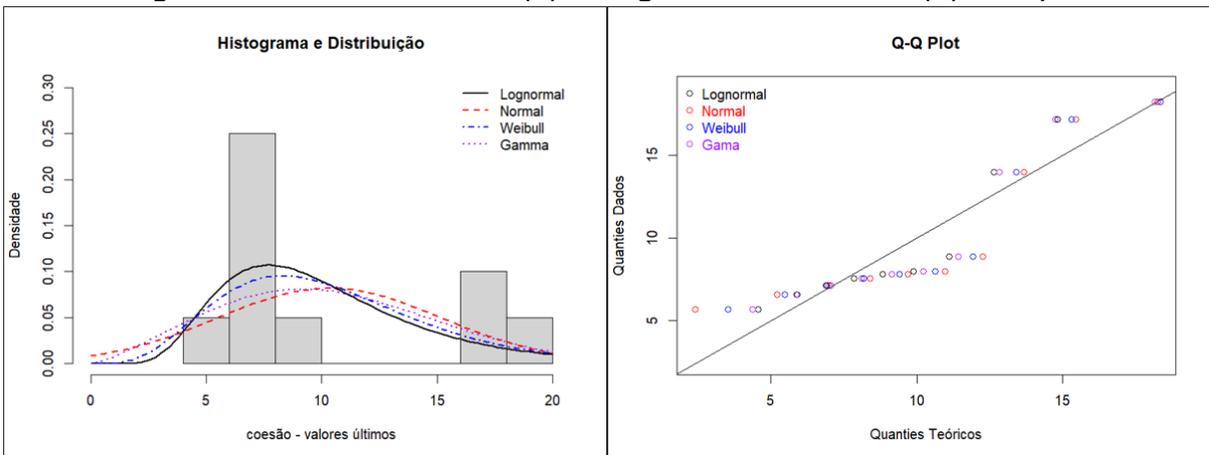
A Figura 44 apresenta uma relação melhor no histograma para as funções normal e Gamma. Os pontos no gráfico Q-Q Plot apresentam um bom alinhamento à reta.

Figura 45 – Ângulo de atrito último: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



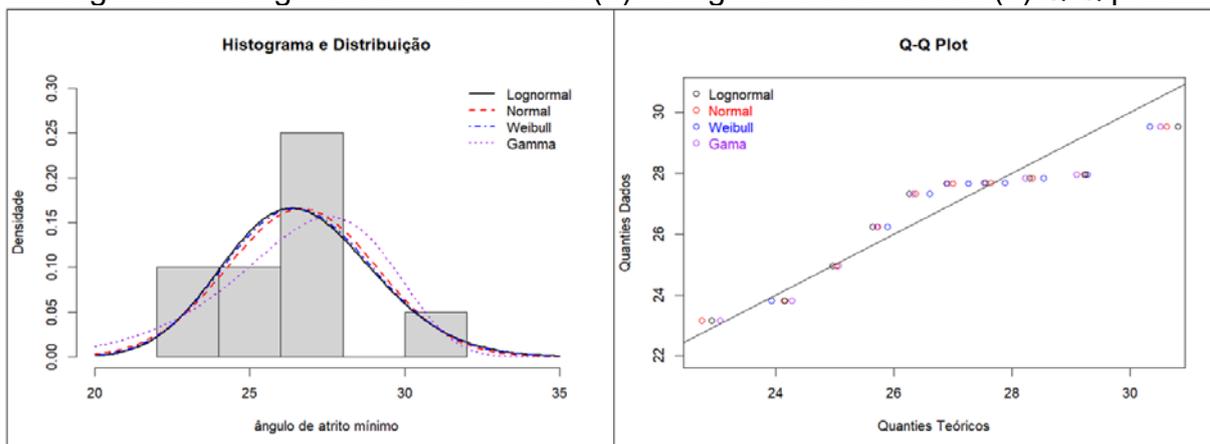
A Figura 45 atende ao critério para as funções normal, lognormal e Weibull, com um pequeno deslocamento para a função Gamma. No gráfico Q-Q Plot os pontos seguem o alinhamento da reta, com exceção das extremidades, onde há um desvio.

Figura 46 – Coesão última: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



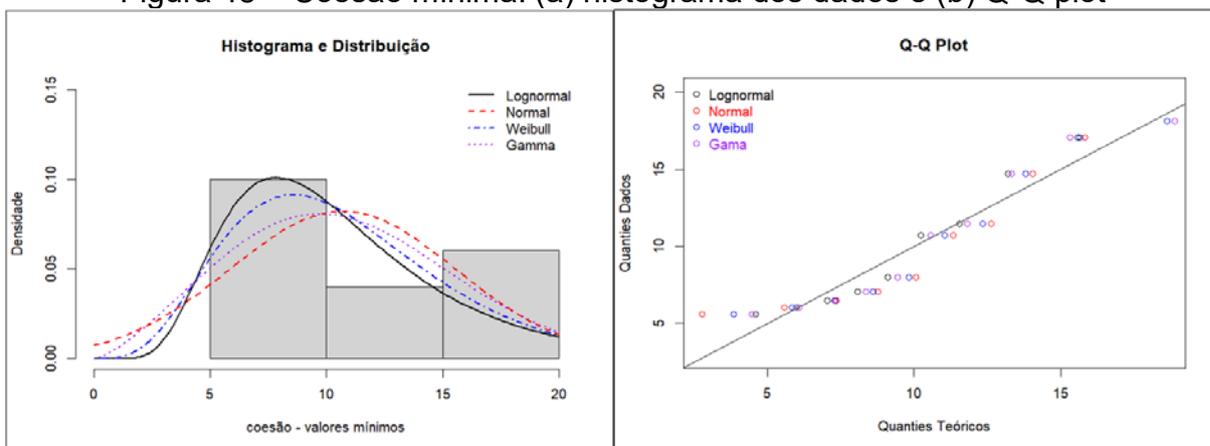
Todas as funções não atendem ao critério na Figura 46 para a coesão última, também retratado no gráfico Q-Q Plot pelo grande desvio dos pontos, ratificando a conclusão pela rejeição da hipótese.

Figura 47 – Ângulo de atrito mínimo: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



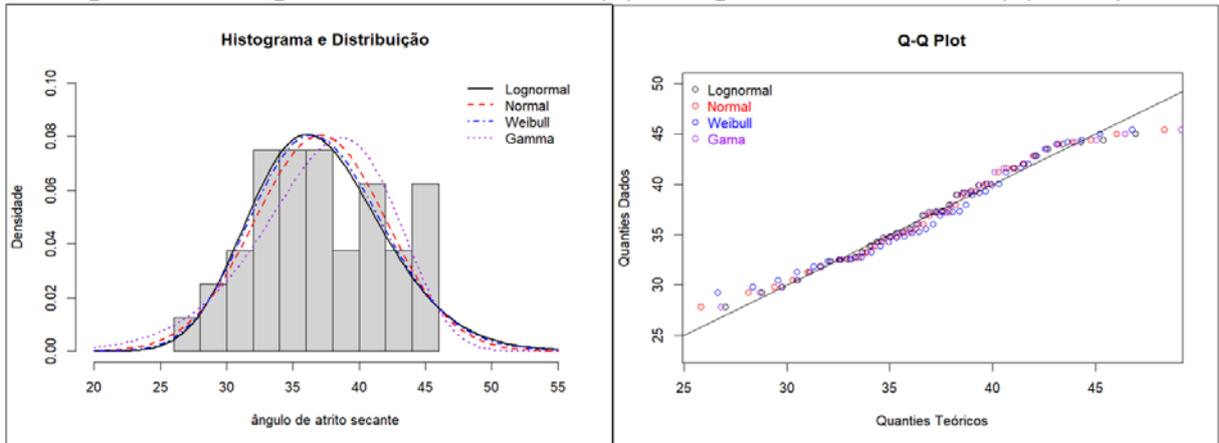
A Figura 47 atende ao critério para todas as funções, exceção para a função Gamma. No gráfico Q-Q Plot há um grande desvio dos pontos plotados em relação à reta.

Figura 48 – Coesão mínima: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



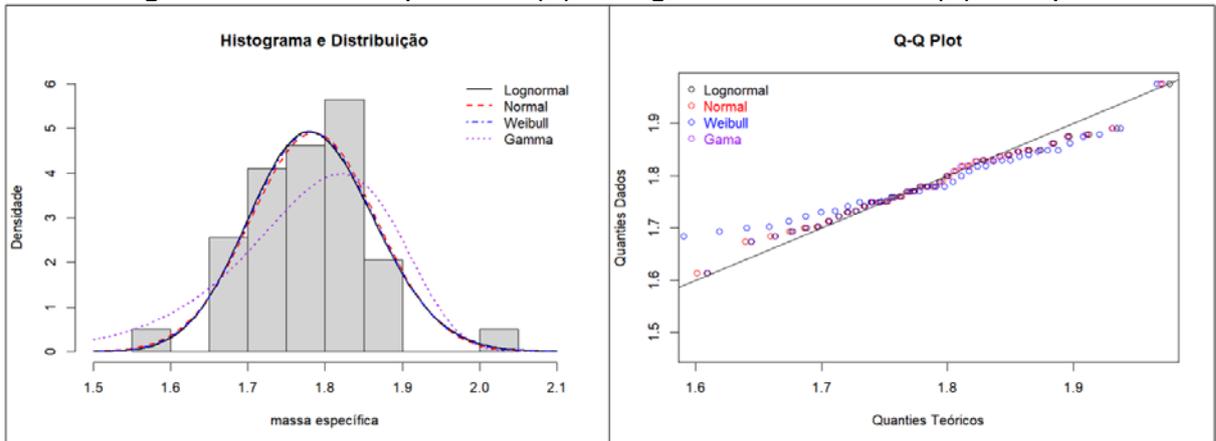
A Figura 48 apresenta uma melhor aderência para as funções normal e Gamma. No gráfico Q-Q Plot há desvio maior nos pontos iniciais do gráfico.

Figura 49 – Ângulo de atrito secante: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



A Figura 49 demonstra uma melhor aderência no histograma para as funções normal, lognormal e Weibull. Observa-se um ótimo alinhamento no gráfico Q-Q Plot na região central da reta com desvio nas bordas.

Figura 50 – Peso específico: (a) histograma dos dados e (b) Q-Q plot



A Figura 50 também demonstra uma melhor aderência no histograma para as funções normal, lognormal e Weibull. O alinhamento no gráfico Q-Q Plot é melhor na região central da reta também com desvio nas bordas.

5 APLICAÇÃO NUMÉRICA: ANÁLISE DE ESTABILIDADE E PROBABILIDADE DE FALHA

Neste capítulo são apresentadas simulações de estabilidade efetuadas no software Plaxis LE objetivando análises de sensibilidade, além de simulações com os parâmetros geotécnicos resultantes dos ensaios realizados em Cocal do Sul/SC. O resultado das análises visa identificar fatores de segurança e probabilidade de falha. Também é apresentado um comparativo entre valores determinísticos e probabilísticos, e de probabilísticos obtidos considerando campo homogêneo versus probabilísticos com campo com variação espacial.

5.1 Software utilizado

5.1.1 Visão geral

O software Plaxis LE é um software que permite a avaliação da estabilidade de problemas bidimensionais e tridimensionais através da análise de equilíbrio limite. Possui implementados os métodos clássicos de Fellenius, Bishop, Morgenstern and Price, Spencer, Janbu, além dos Métodos 1 e 2 do Corpo de Engenheiros Americanos, Método Lowe-Karafiath,, Método GLE (Fredlund), Método Sarma, Método Sarma de Fatias Não-Verticais, Método Kulhawy e Método SAFE-DP.

De acordo com o manual teórico do programa, Bentley Systems Incorporated (2021), o PLAXIS LE foi projetado para ser um conjunto de ferramentas para a análise de estabilidade de taludes tecnicamente abrangente que implementa técnicas de busca e solução de ponta, bem como métodos clássicos de equilíbrio limite de fatias. Também são destacados como vantagens do software recursos como análise estocástica avançada (Monte Carlo, Latin Hypercube, APEM), variabilidade espacial (1D, 2D), análise de solo não saturado, algoritmos avançados de busca de superfície crítica de deslizamento, além de possuir plataforma integrada com o software Plaxis de elementos finitos.

Como modelos de resistência o software permite adotar o critério clássico de Mohr Coulomb, além de considerações para solos não saturados.

5.1.2 Análise probabilística

Nas opções avançadas para análises probabilísticas o software tem implementado o Método de Monte Carlo, além do Método Latin Hipercube e Método APM (Alternate Point Estimated Method). Além da seleção do método é possível optar entre dois critérios de seleção da superfície de pesquisa, método fixed ou método floating.

Considerando a seleção da superfície de pesquisa pelo método fixed a superfície de deslizamento crítica é inicialmente determinada com base nos parâmetros médios do material, análise determinística. Após a definição da superfície crítica está é mantida fixa e é realizada a variação aleatória dos parâmetros. A variação aleatória é repetida até que o número de amostras (dado de entrada) seja satisfeito.

Diferentes métodos de cálculo (por exemplo, Fellenius, Bishop, etc.) podem fornecer diferentes superfícies de deslizamento críticas. A análise probabilística é implementada independentemente em cada superfície de deslizamento crítica obtida de cada método de cálculo.

Teoricamente, a superfície crítica de deslizamento varia a cada conjunto subsequente de parâmetros probabilísticos. A opção de superfície de deslizamento crítica flutuante (floating) é usada para este propósito. Neste caso, a superfície de deslizamento crítica é obtida para cada conjunto de parâmetros probabilísticos.

Por fim, no módulo probabilístico o software permite estabelecer a variabilidade espacial através das seguintes considerações: none – nenhuma variabilidade espacial - representa um único valor para cada teste em cada região distinta para a propriedade a ser considerada; 1D Spatial Variation – variabilidade espacial em uma das direções – permite estabelecer a variabilidade em profundidade (y) ou na distância horizontal (x) quando apenas uma dessas é conhecida; e 2-D Spatial Variability – variabilidade espacial em ambas as direções x e y.

A opção de Variabilidade Espacial 2D (2-D Spatial Variability) é utilizada para gerar um campo aleatório bidimensional para as propriedades do solo, usando a Teoria do Campo Aleatório proposta por Fenton e Vanmarcke (1990). Existem cinco funções de covariância (dlavx2, dlsep2, dlspx2, dlafr2, dlsfr2) disponíveis para a

geração de campos aleatórios bidimensionais, sendo as mais utilizadas $dlavx2$, $dlsep2$, de acordo com Fenton e Griffiths (2018).

Para gerar um campo aleatório, o usuário pode determinar o Tipo de Distribuição, o Valor Médio, o Desvio Padrão, o Comprimento de Correlação e o Número de Grade para cada propriedade do solo conforme descrito a seguir:

1. Tipo de Distribuição: O software simula até 3 campos de propriedades do solo (coesão, ângulo de atrito, peso específico). Os campos individuais são gerados como campos aleatórios gaussianos padrão usando o algoritmo 2-D Local Average Subdivision (LAS). Esses campos são então combinados para produzir campos gaussianos padrão correlacionados usando a abordagem de decomposição de matriz de covariância. Finalmente, os campos individuais são transformados para que tenham as distribuições marginais desejadas. Essas transformações são as seguintes: normal, lognormal e limitado.

2. Comprimento de Correlação: Os comprimentos de correlação fornecem a escala de flutuação nas direções x e y . Os comprimentos de correlação governam a taxa de decaimento da correlação entre pontos no campo aleatório em função da distância entre eles. Em termos gerais, a escala de flutuação pode ser considerada como a distância ao longo da qual os pontos no campo aleatório mostram uma correlação substancial.

O efeito do comprimento da correlação pode ser resumido da seguinte forma:

a) Quando o comprimento da correlação é pequeno, os campos aleatórios tendem a ser grosseiros;

b) À medida que o comprimento da correlação é próximo de zero, todos os pontos no campo tornam-se não correlacionados entre si e o campo torna-se infinitamente disperso. Isso é chamado de ruído branco e fisicamente irrealizável;

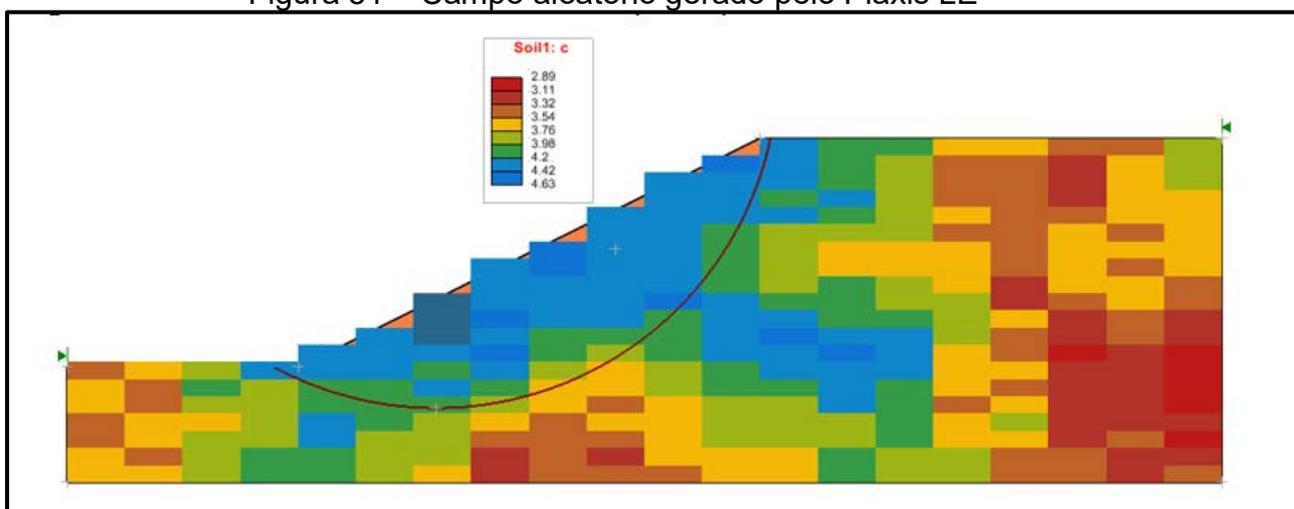
c) À medida que o comprimento da correlação aumenta, o campo se torna mais suave;

d) Como o comprimento da correlação é próximo de ∞ , todos os pontos nos campos tornam-se completamente correlacionados para funções de correlação em escala finita. Se o campo estiver estacionário, isso significa que o campo aleatório se torna completamente uniforme como um modelo de solo tradicional.

3. Número de grade: Fornece o número de divisões para uma massa de solo nas direções x e y .

Na Figura 51 é apresentado um campo aleatório gerado pelo software, considerando o parâmetro de coesão.

Figura 51 – Campo aleatório gerado pelo Plaxis LE



Fonte: Manual Teórico – Plaxis LE

5.2 Definição da geometria de referência e parâmetros determinísticos

Foram simulados taludes com três inclinações diferentes, 1(V):1(H), 1(V):1,5(H) e 1(V):2(H), todos com 11 m de altura. O solo foi simulado com as seguintes propriedades geotécnicas, inicialmente consideradas como determinísticas: coesão 5 kPa, ângulo de atrito 30° e peso unitário 19 kN/m^3 .

As funções densidade de probabilidade de falha foram: normal para ângulo de atrito e peso específico e lognormal para a coesão. Os métodos de cálculo analisados foram: Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenster-Price (MR) e Fredlund (GLE).

Nas Figuras 52, 53 e 54 são apresentadas as seções de entrada, para cada inclinação de talude.

Figura 52 – Seção modelada – talude 1:1

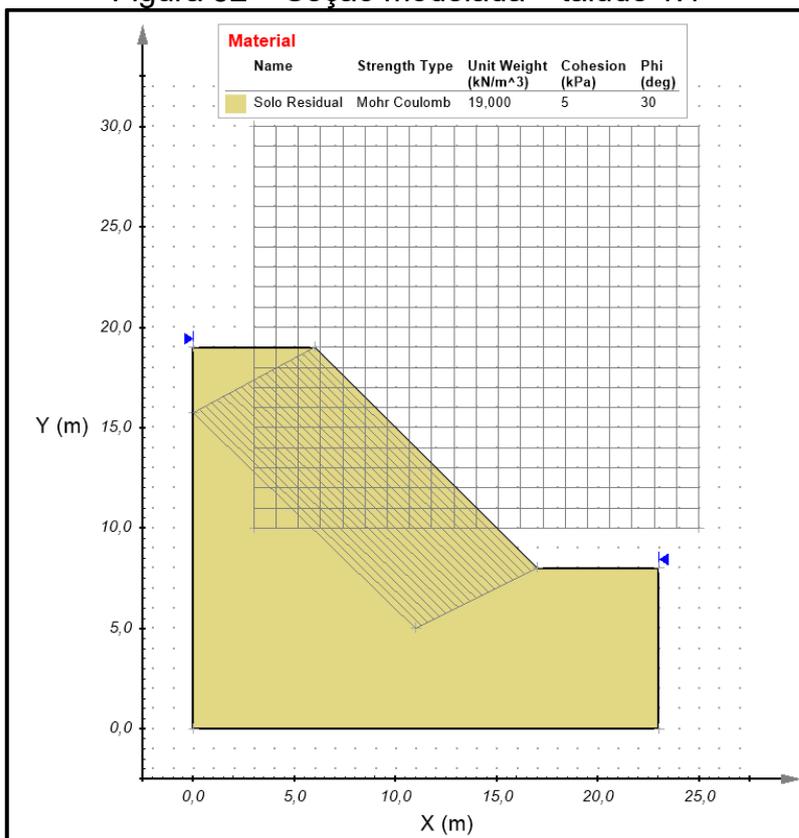


Figura 53 – Seção modelada – talude 1:1,5

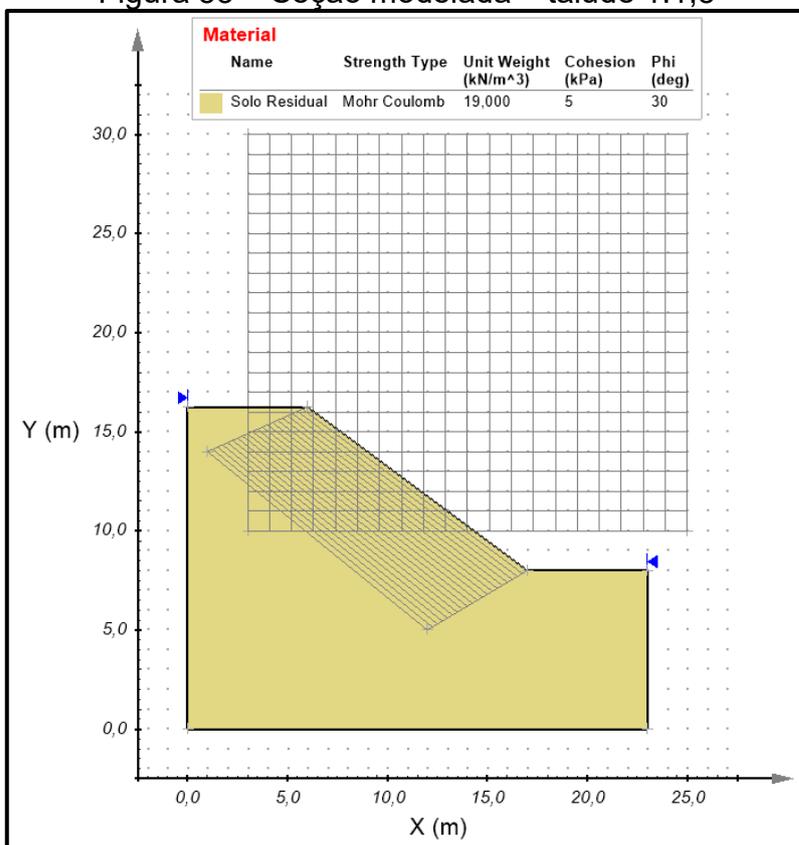
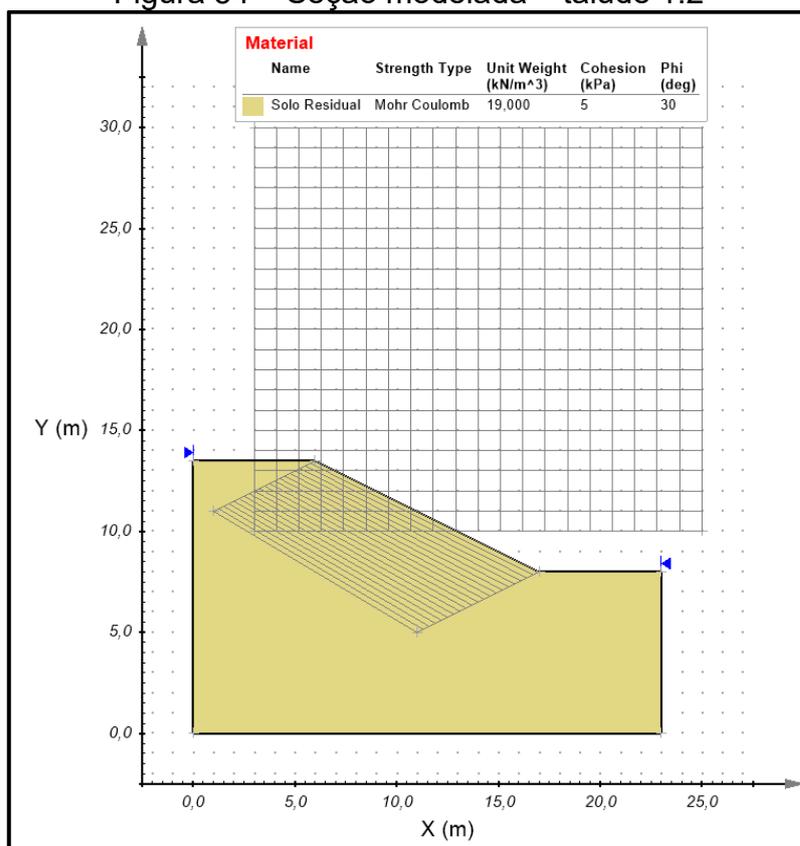


Figura 54 – Seção modelada – talude 1:2



5.2.1 Fator de segurança determinístico

Com base nas geometrias definidas e parâmetros descritos foram obtidos os resultados compilados na Tabela 18, considerando os parâmetros determinísticos. Observa-se que a seção com inclinação de 1(V):1(H) apresentou FS abaixo da unidade para todos os métodos avaliados, com valor mínimo de 0,911 considerando o método de Janbu a 0,961 para o método de Bishop. A inclinação 1(V):1,5(H) apresentou variação de FS de 1,189 a 1,560, enquanto a inclinação de 1(V):2(H) apresentou resultado de FS de 1,750 a 1,872.

Tabela 18 – Resumo dos resultados

Método	Inclinação do talude		
	1(V):1(H)	1(V):1,5(H)	1(V):2(H)
	FS	FS	FS
Fellenius	0,919	1,202	1,664
Bishop	0,961	1,260	1,872
Janbu	0,911	1,189	1,750
Spencer	0,958	1,257	1,870

Método	Inclinação do talude		
	1(V):1(H)	1(V):1,5(H)	1(V):2(H)
	FS	FS	FS
Morgenster-Price	0,957	1,257	1,869
Fredlund (GLE)	0,957	1,257	1,869

Ainda, conforme resultados apresentados o talude com inclinação 1(V):1(H) apresentou um FS médio de 0,944, com diferença de 6% entre os valores máximo e mínimo. Para o talude 1(V):1,5(H) o FS médio é de 1,237, também com diferença de 6% entre os valores limites. Já para o talude 1(V):2(H) a diferença é de 12,5%, com FS médio de 1,805.

Os fatores de segurança aumentaram em 31% e 70%, alterando-se a inclinação para 1(V):1,5(H) e para 1(V):2(H), respectivamente, em relação ao talude 1:1.

5.3 Análise da variabilidade espacial considerando a seção de referência

5.3.1 Dados considerados na análise

Visando um melhor entendimento de como as características de variação espacial interferem na estabilidade e probabilidade de falha foi realizada uma análise de sensibilidade.

Nesta análise de sensibilidade foram consideradas 66 combinações de parâmetros para cada inclinação de talude avaliado, totalizando 198 combinações. Na simulação 0 de cada seção foram considerados todos os parâmetros com seus valores determinísticos para quantificação dos fatores de segurança da seção homogênea, valores apresentados no item 5.2. Nas simulações de 1 a 65 foram estabelecidas variações espaciais nas dimensões X e Y de acordo com a seguinte estrutura lógica: As simulações de 1 a 10 avaliaram somente a variação do ângulo de atrito, assumindo valores de COV de 5% e 15%; nas simulações de 11 a 20 foram avaliados os impactos da variação da coesão, assumindo valores de COV de 20% e 50%; na sequência, as simulações de 21 a 30 avaliaram o impacto da variação do peso específico, variando de acordo com COV de 3% e 7%.

Em todas as variações as distâncias de correlação (escala de flutuação) foram de 0,5 m, 1 m e 2 m verticais e 5 m, 10 m e 20 m horizontais. Por fim, as simulações

de 31 a 65 realizaram a variação simultânea de todos os parâmetros avaliados. Tanto para os valores de COV, quanto para as escalas de flutuação, foram estabelecidas de acordo com a faixa observada em literatura. A função de covariância, para todas as análises, foi d_{lsep2} .

Cada simulação contou ainda com a análise de duas condições para a localização crítica da superfície de deslizamento: fixed e floating, mas neste último caso, por questões de tempo de processamento, foi avaliado apenas para o método Fellenius. Na condição fixed a superfície de deslizamento mais crítica de todas as superfícies de deslizamento de teste é determinada usando análise determinística. A análise probabilística é então realizada na superfície de deslizamento mais crítica para cada conjunto de variáveis aleatórias. Em outras palavras, o cálculo do Fator de Segurança será repetido até que o número de amostras seja satisfeito na mesma superfície de deslizamento obtida a partir da análise determinística.

Na condição floating a superfície de deslizamento mais crítica de todas as superfícies de deslizamento de teste é obtida para cada conjunto de parâmetros probabilísticos. A única diferença em relação à opção fixed é que a superfície de deslizamento crítica varia para cada conjunto de parâmetros probabilísticos na opção floating, enquanto a superfície de deslizamento crítica é fixa na opção fixed.

Em todas as análises foi considerado um número de interações (N) de 1.000 como referência. Esse número é representativo para um intervalo de confiança de 90% e erro de 0,05.

5.3.2 Resultados de probabilidade de falha e fator de segurança

O resumo dos resultados obtidos nas 66 análises efetuadas para cada inclinação pode ser visualizado nas tabelas a seguir. A Tabela 19 apresenta o detalhamento do conjunto de parâmetros considerados e resultados para inclinação de 1(V):1(H), a Tabela 20 para inclinação de 1(V):1,5(H) e a Tabela 21 para inclinação de 1(V):2(H). Além do resumo geral apresentado nas Tabelas, resultados típicos são discutidos ao longo do texto. Observando o conjunto geral de resultados pode-se observar que em relação a probabilidade de falha o resultado foi de 0% de probabilidade para as simulações no talude 1(V):2(H); 23% das simulações apresentaram probabilidade de falha, com PF, nestes casos, variando entre 0,1% e

4,3% considerando o talude com inclinação de 1(V):1,5(H) e; para o talude 1(V):1(H) todas as simulações resultaram em probabilidade de falha alta, entre 80,4% e 100%.

Variando-se os coeficientes de variação para as propriedades geotécnicas não há alteração dos fatores de segurança médios, seja na consideração de busca da superfície crítica fixed ou floating, para todos os taludes. Para a coesão efetiva e para o ângulo de atrito efetivo, aumentando-se o COV, reduz-se a probabilidade de falha (PF), para taludes 1(V):1(H). A PF para o peso específico não se altera com a alteração do COV. Para os demais taludes, conforme explanado anteriormente, a PF é de 0% em quase sua totalidade. A influência da variação de COV será também discutida nas Figuras 55 a 57.

Em relação às diferentes distâncias de correlação modeladas, para as simulações no talude 1(V):2(H) não há alteração dos resultados, variando-se as combinações para as distâncias de correlação vertical e horizontal. Para o talude 1(V):1(H), as menores probabilidades de falha ocorrem com $\Theta_v=2m$ e $\Theta_h=5m$. Para o talude 1(V):1,5(H) somente 23% das simulações apresentaram probabilidade de falha, na grande maioria quando a distância de correlação horizontal é igual a 5 m.

Variando-se entre as condições fixed e floating, para as simulações realizadas no talude 1(V):2(H) não há alteração dos resultados do FS médio de 1,664 alterando-se a localização crítica da superfície de deslizamento, lembrando que na condição floating as simulações foram efetuadas apenas para o método de Fellenius. Para o talude 1(V):1,5(H), a modelagem com superfície variável (floating) também indicou uma probabilidade de falha em 23% das simulações, variando entre 0,1% e 12,9%. Nas simulações com o talude 1(V):1(H), na condição floating todos os resultados foram iguais ou superiores à condição fixed, com uma média de probabilidade de falha de 99,1%, contra 96,8% na condição fixed.

A Tabela 19 apresenta os resultados para a inclinação de talude 1(V):1(H).

Tabela 19 – Talude 1(V):1(H)

Simulação	Propriedade do material								Resultados - FIXED							Resultados - FLOATING	
	ϕ (graus)		C (KN/m ²)		γ (KN/m ³)		Θ		Análise de estabilidade							Análise de estabilidade	
	Valor	COV	Valor	COV	Valor	COV	v	h	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE	FS - Fellenius	PF (%)
S0	30	0	5	0	19	0	0	0	0,919	-	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	-	-
S1	30	0,05	5	-	19	-	0,5	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S2	30	0,05	5	-	19	-	1	5	0,915	100,0	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959	0,915	100
S3	30	0,05	5	-	19	-	2	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S4	30	0,05	5	-	19	-	0,5	10	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S5	30	0,05	5	-	19	-	0,5	20	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S6	30	0,15	5	-	19	-	0,5	5	0,919	99,6	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,9
S7	30	0,15	5	-	19	-	1	5	0,919	96,6	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98,9
S8	30	0,15	5	-	19	-	2	5	0,919	93,2	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	95,8
S9	30	0,15	5	-	19	-	0,5	10	0,915	99,2	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959	0,915	100
S10	30	0,15	5	-	19	-	0,5	20	0,915	99,3	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959	0,915	100
S11	30	-	5	0,5	19	-	0,5	5	0,915	100,0	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959	0,915	100
S12	30	-	5	0,5	19	-	1	5	0,919	98,5	0,961	0,911	0,957	0,957	0,957	0,919	100
S13	30	-	5	0,5	19	-	2	5	0,919	95,6	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98,2
S14	30	-	5	0,5	19	-	0,5	10	0,919	99,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S15	30	-	5	0,5	19	-	0,5	20	0,919	99,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S16	30	-	5	0,2	19	-	0,5	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S17	30	-	5	0,2	19	-	1	5	0,915	100,0	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959	0,915	100
S18	30	-	5	0,2	19	-	2	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S19	30	-	5	0,2	19	-	0,5	10	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S20	30	-	5	0,2	19	-	0,5	20	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S21	30	-	5	-	19	0,07	0,5	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S22	30	-	5	-	19	0,07	1	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S23	30	-	5	-	19	0,07	2	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S24	30	-	5	-	19	0,07	0,5	10	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S25	30	-	5	-	19	0,07	0,5	20	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S26	30	-	5	-	19	0,03	0,5	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S27	30	-	5	-	19	0,03	1	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S28	30	-	5	-	19	0,03	2	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S29	30	-	5	-	19	0,03	0,5	10	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S30	30	-	5	-	19	0,03	0,5	20	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S31	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	5	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S32	30	0,05	5	0,2	19	0,03	1	5	0,919	99,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,9
S33	30	0,05	5	0,2	19	0,03	2	5	0,919	98,5	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,1
S34	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	10	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S35	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	20	0,919	100,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S36	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	5	0,919	97,0	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,3
S37	30	0,15	5	0,2	19	0,03	1	5	0,919	91,4	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	97,3
S38	30	0,15	5	0,2	19	0,03	2	5	0,919	85,6	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	93,8
S39	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	10	0,919	96,8	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,2
S40	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	20	0,919	96,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,2
S41	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	5	0,919	98,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S42	30	0,05	5	0,5	19	0,03	1	5	0,919	94,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,6
S43	30	0,05	5	0,5	19	0,03	2	5	0,919	90,2	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	96,4
S44	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	10	0,919	98,8	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S45	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	20	0,919	98,9	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,8
S46	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	5	0,919	100	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S47	30	0,05	5	0,2	19	0,07	1	5	0,919	99,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S48	30	0,05	5	0,2	19	0,07	2	5	0,919	98,5	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,1
S49	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	10	0,919	100	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S50	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	20	0,919	100	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S51	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	5	0,919	92,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,4
S52	30	0,15	5	0,5	19	0,03	1	5	0,919	84,6	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	97,2
S53	30	0,15	5	0,5	19	0,03	2	5	0,919	80,4	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	92,7
S54	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	10	0,919	92,8	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98,5
S55	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	20	0,919	93,1	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98
S56	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	5	0,919	98,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S57	30	0,05	5	0,5	19	0,07	1	5	0,919	94,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98,9
S58	30	0,05	5	0,5	19	0,07	2	5	0,919	90,2	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	96,3
S59	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	10	0,919	98,8	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	100
S60	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	20	0,919	98,9	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,8
S61	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	5	0,919	92,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	99,4
S62	30	0,15	5	0,5	19	0,07	1	5	0,919	80,4	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	97,2
S63	30	0,15	5	0,5	19	0,07	2	5	0,919	80,6	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	92,7
S64	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	10	0,919	92,8	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98,5
S65	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	20	0,919	93,1	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957	0,919	98

Visando um comparativo direto entre métodos de busca de superfície fixa (fixed) e flutuante (floating) são apresentadas a Figura 55 e a Figura 56. A Figura 55a apresenta o resultado de output do software para superfície de falha, fator de segurança, probabilidade entre outras informações para a simulação S32 realizada para a condição fixed. Já a Figura 55b ilustra a saída do software para o mesmo conjunto de parâmetros, porém na condição de busca floating. Já a Figura 56 apresenta os histogramas de FS obtidos.

A partir destas figuras pode-se observar que apesar dos diferentes sistemas de busca da superfície de falha o resultado obtido para a superfície crítica é bastante similar (Figura 55). No entanto a plotagem dos histogramas (Figura 56) revela uma maior dispersão para a modelagem considerando a superfície flutuante o que resulta em uma probabilidade de falha maior nesse caso, embora os valores médios de FS sejam similares.

Figura 55 – Simulação S32 – inclinação 1(V):1(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating)

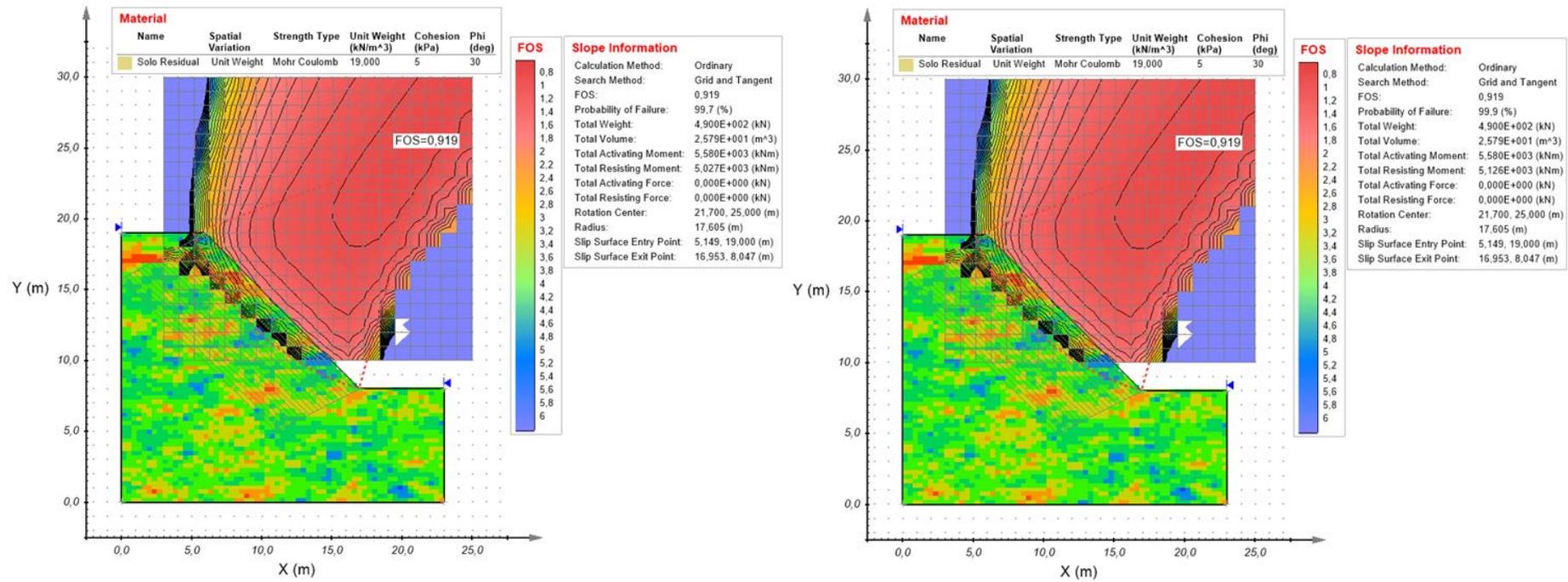
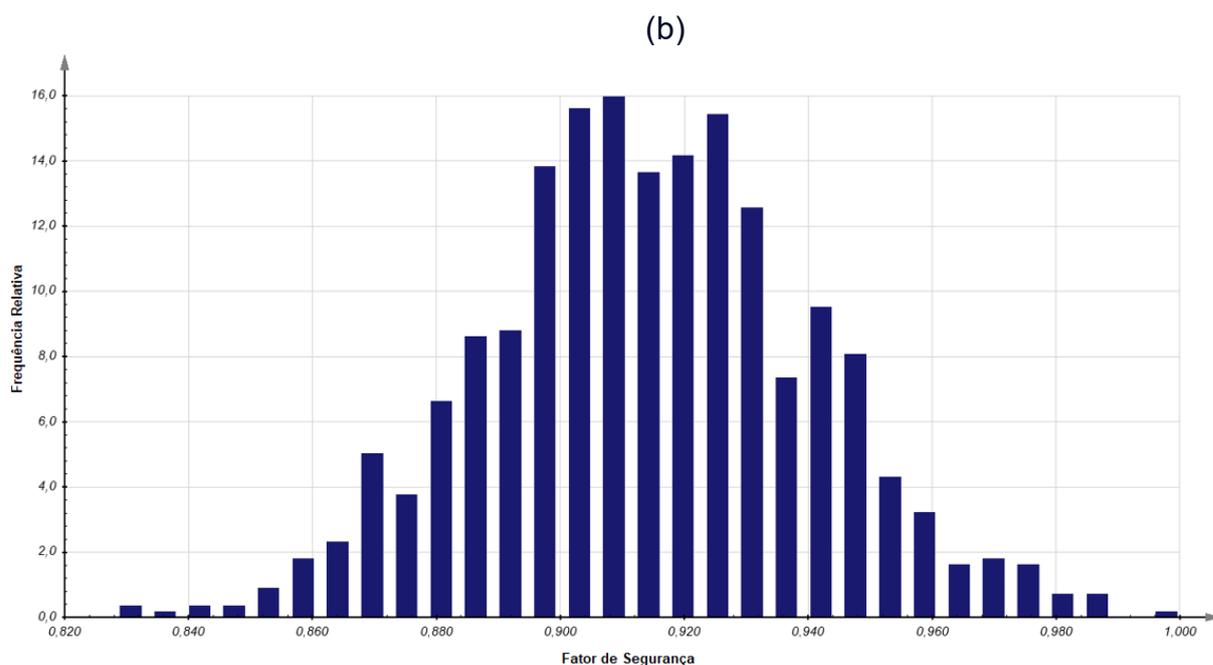
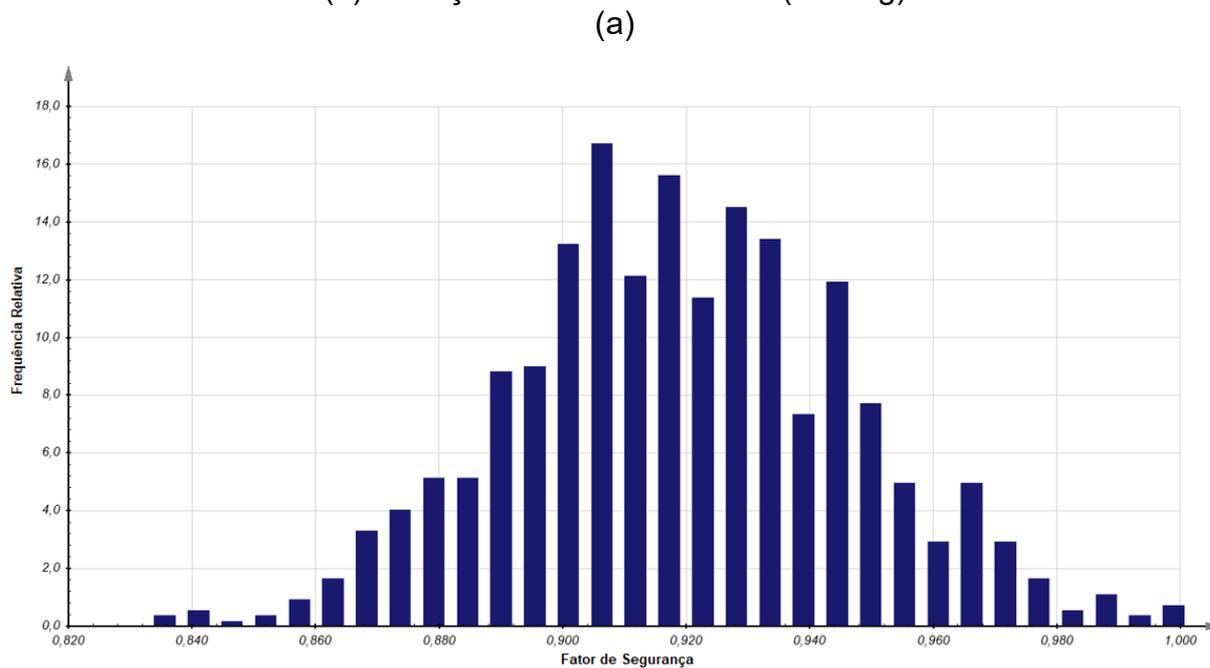


Figura 56 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating)



Para uma análise acerca da influência conjunta dos diferentes valores de coeficiente de variação (COV) adotados e diferentes escalas de flutuação foram construídas as Figuras 57, 58 e 59. Nessa análise optou-se por normalizar a relação entre escalas de flutuação horizontal (Θ_h) e vertical (Θ_v) criando um parâmetro adimensional Θ_v/Θ_h onde valores mais próximos da unidade indicam campos com variabilidade horizontal e vertical mais próxima. Em contrapartida, campos com

parâmetro Θ_v/Θ_h mais baixos indicam variabilidade horizontal mais pronunciada. A análise foi realizada apenas para o Talude com inclinação de 1:1, uma vez que nesta condição 100% das simulações apresentaram probabilidade de falha.

Na Figura 57 apresenta-se o resultado da variação da probabilidade de falha considerando a variação somente do ângulo de atrito com COV de 5% (Figura 57a) e COV de 15% (Figura 57b). Observa-se que para o COV de 5% não há variação da probabilidade de falha, independente da espacialização dos parâmetros todas as simulações resultam em 100% de probabilidade de falha. Já na Figura 57b, observa-se uma redução da probabilidade de falha de acordo com o incremento da relação Θ_v/Θ_h , indicando que campos com características de distribuição espacial mais homogênea resultam em menores probabilidades de falha. O mesmo comportamento foi observado na Figura 58 na qual é ilustrada a variação da probabilidade considerando o parâmetro coesivo. Uma combinação da distribuição espacial nos casos onde o COV é mais alto em campos mais homogêneos pode resultar em parâmetros de resistência mais elevados em distâncias mais próximas. Essa combinação resulta em menor probabilidade de falha.

Complementando a análise da variação de COV e escala de flutuação a Figura 59 apresenta a variação da probabilidade em relação a diferentes valores de COV para o peso específico e diferentes escalas de flutuação. Nesse caso não houve variação da probabilidade de falha.

Figura 57 – Probabilidade de falha para ângulo de atrito: (a) COV 5%; (b) COV 15%

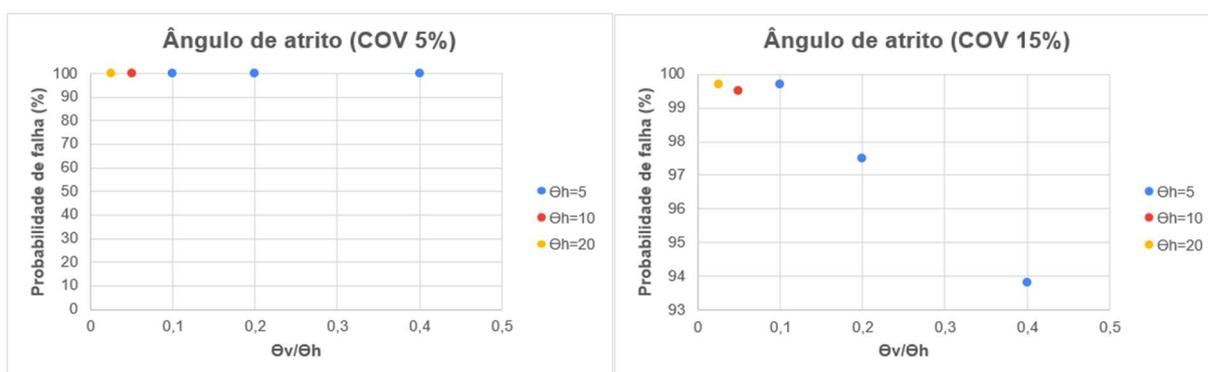


Figura 58 – Probabilidade de falha para coesão: (a) COV 20%; (b) COV 50

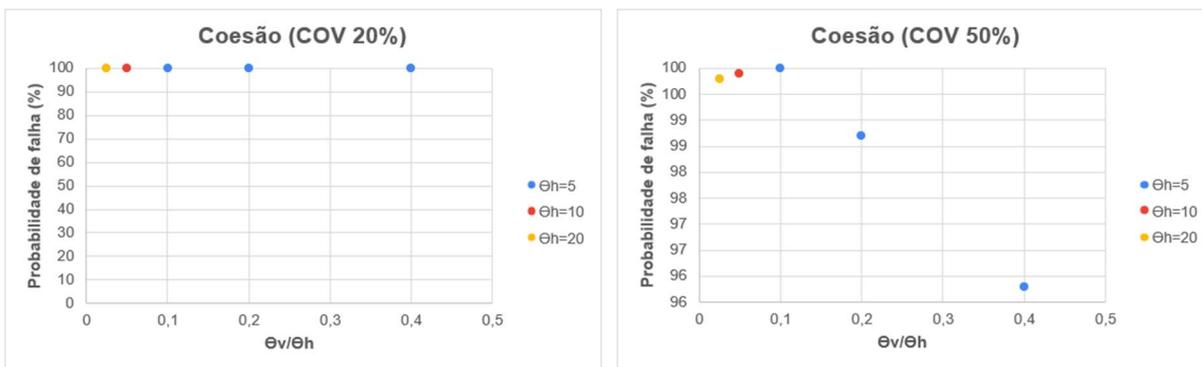
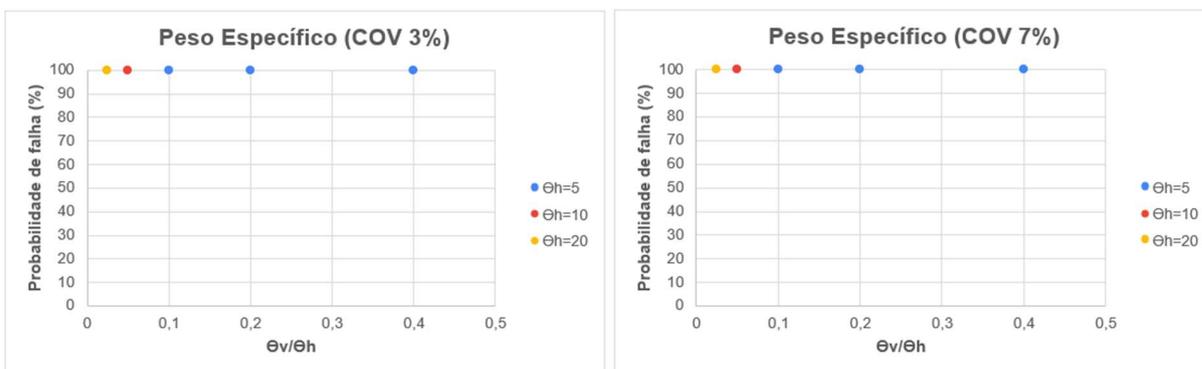


Figura 59 – Probabilidade de falha para peso específico: (a) COV 3%; (b) COV 7%



A seguir, na Tabela 20, apresenta-se os resultados para a inclinação de talude 1(V):1,5(H).

Tabela 20 – Talude 1(V):1,5(H)

Simulação	Propriedade do material								Resultados - FIXED							Resultados - FLOATING	
	φ (graus)		C (KN/m²)		γ (KN/m³)		Θ		Análise de estabilidade							Análise de estabilidade	
	Valor	COV	Valor	COV	Valor	COV	v	h	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE	FS - Fellenius	PF (%)
S0	30	0	5	0	19	0	0	0	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	-	-
S1	30	0,05	5	-	19	-	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S2	30	0,05	5	-	19	-	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S3	30	0,05	5	-	19	-	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S4	30	0,05	5	-	19	-	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S5	30	0,05	5	-	19	-	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S6	30	0,15	5	-	19	-	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S7	30	0,15	5	-	19	-	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S8	30	0,15	5	-	19	-	2	5	1,202	0,1	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	0,1
S9	30	0,15	5	-	19	-	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S10	30	0,15	5	-	19	-	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S11	30	-	5	0,5	19	-	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S12	30	-	5	0,5	19	-	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S13	30	-	5	0,5	19	-	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S14	30	-	5	0,5	19	-	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S15	30	-	5	0,5	19	-	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S16	30	-	5	0,2	19	-	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S17	30	-	5	0,2	19	-	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S18	30	-	5	0,2	19	-	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S19	30	-	5	0,2	19	-	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S20	30	-	5	0,2	19	-	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S21	30	-	5	-	19	0,07	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S22	30	-	5	-	19	0,07	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S23	30	-	5	-	19	0,07	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S24	30	-	5	-	19	0,07	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S25	30	-	5	-	19	0,07	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S26	30	-	5	-	19	0,03	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S27	30	-	5	-	19	0,03	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S28	30	-	5	-	19	0,03	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S29	30	-	5	-	19	0,03	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S30	30	-	5	-	19	0,03	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S31	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S32	30	0,05	5	0,2	19	0,03	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S33	30	0,05	5	0,2	19	0,03	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S34	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S35	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S36	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S37	30	0,15	5	0,2	19	0,03	1	5	1,202	0,2	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	0,8
S38	30	0,15	5	0,2	19	0,03	2	5	1,202	1,1	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	2,6
S39	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S40	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S41	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S42	30	0,05	5	0,5	19	0,03	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S43	30	0,05	5	0,5	19	0,03	2	5	1,202	0,1	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	0,4
S44	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S45	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S46	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S47	30	0,05	5	0,2	19	0,07	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S48	30	0,05	5	0,2	19	0,07	2	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S49	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S50	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S51	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	5	1,202	0,3	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	1,8
S52	30	0,15	5	0,5	19	0,03	1	5	1,202	1,7	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	6,1
S53	30	0,15	5	0,5	19	0,03	2	5	1,202	4,3	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	12,9
S54	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	10	1,202	0,3	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	2,5
S55	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	20	1,202	0,5	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	3,1
S56	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S57	30	0,05	5	0,5	19	0,07	1	5	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S58	30	0,05	5	0,5	19	0,07	2	5	1,202	0,1	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	0,4
S59	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	10	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S60	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	20	1,202	-	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	-
S61	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	5	1,202	0,3	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	1,8
S62	30	0,15	5	0,5	19	0,07	1	5	1,202	1,7	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	6,1
S63	30	0,15	5	0,5	19	0,07	2	5	1,202	4,3	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	12,9
S64	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	10	1,202	0,3	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	2,5
S65	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	20	1,202	0,5	1,26	1,189	1,257	1,257	1,257	1,202	3,1

Para o talude 1(V):1,5(H) buscou-se também um comparativo direto entre métodos de busca de superfície fixa (fixed) e flutuante (floating), conforme apresentadas na Figura 60 e na Figura 61. A Figura 60a apresenta o resultado de output do software para superfície de falha, fator de segurança, probabilidade entre outras informações para a simulação S32 realizada para a condição fixed. Já a Figura 60b ilustra a saída do software para o mesmo conjunto de parâmetros, porém na condição de busca floating. A Figura 61 apresenta os histogramas de FS obtidos.

A partir destas figuras também se conclui, assim como no talude 1(V):1(H), que apesar dos diferentes sistemas de busca da superfície de falha o resultado obtido para a superfície crítica é bastante similar (Figura 60). No entanto, a plotagem dos histogramas (Figura 61) revela uma maior dispersão para a modelagem considerando a superfície flutuante o que resulta em uma probabilidade de falha maior nesse caso, embora os valores médios de FS sejam similares.

Figura 60 – Simulação S32 – inclinação 1(V):1,5(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating)

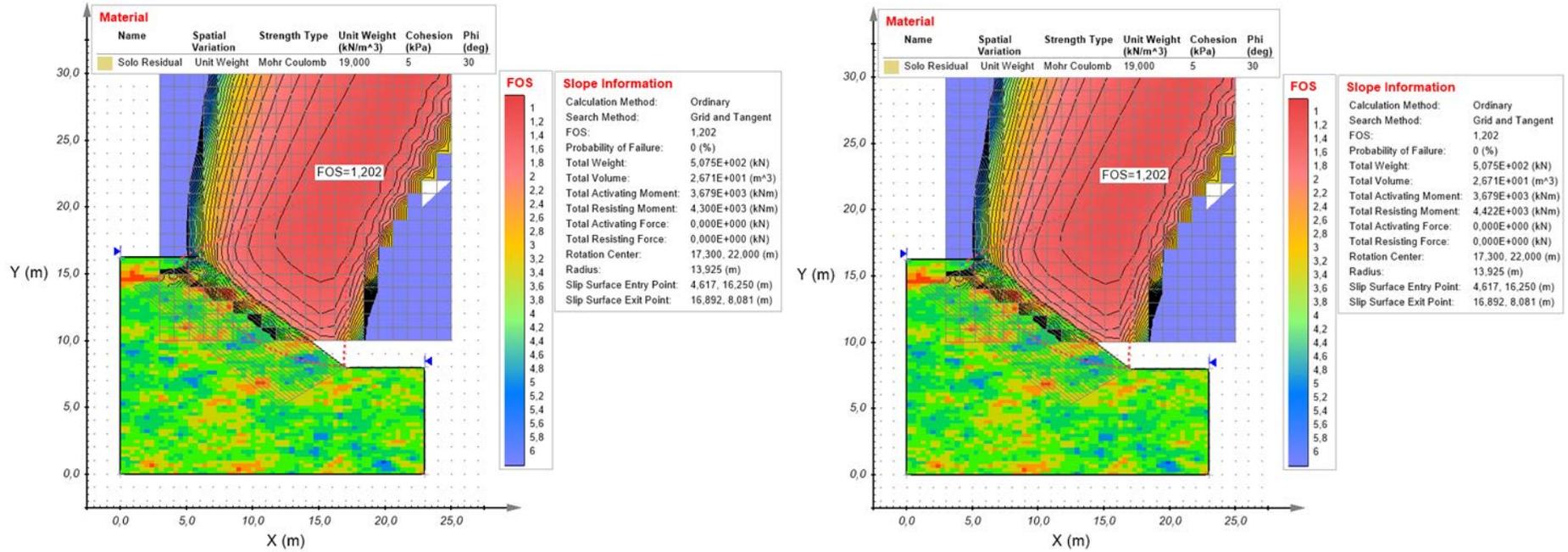
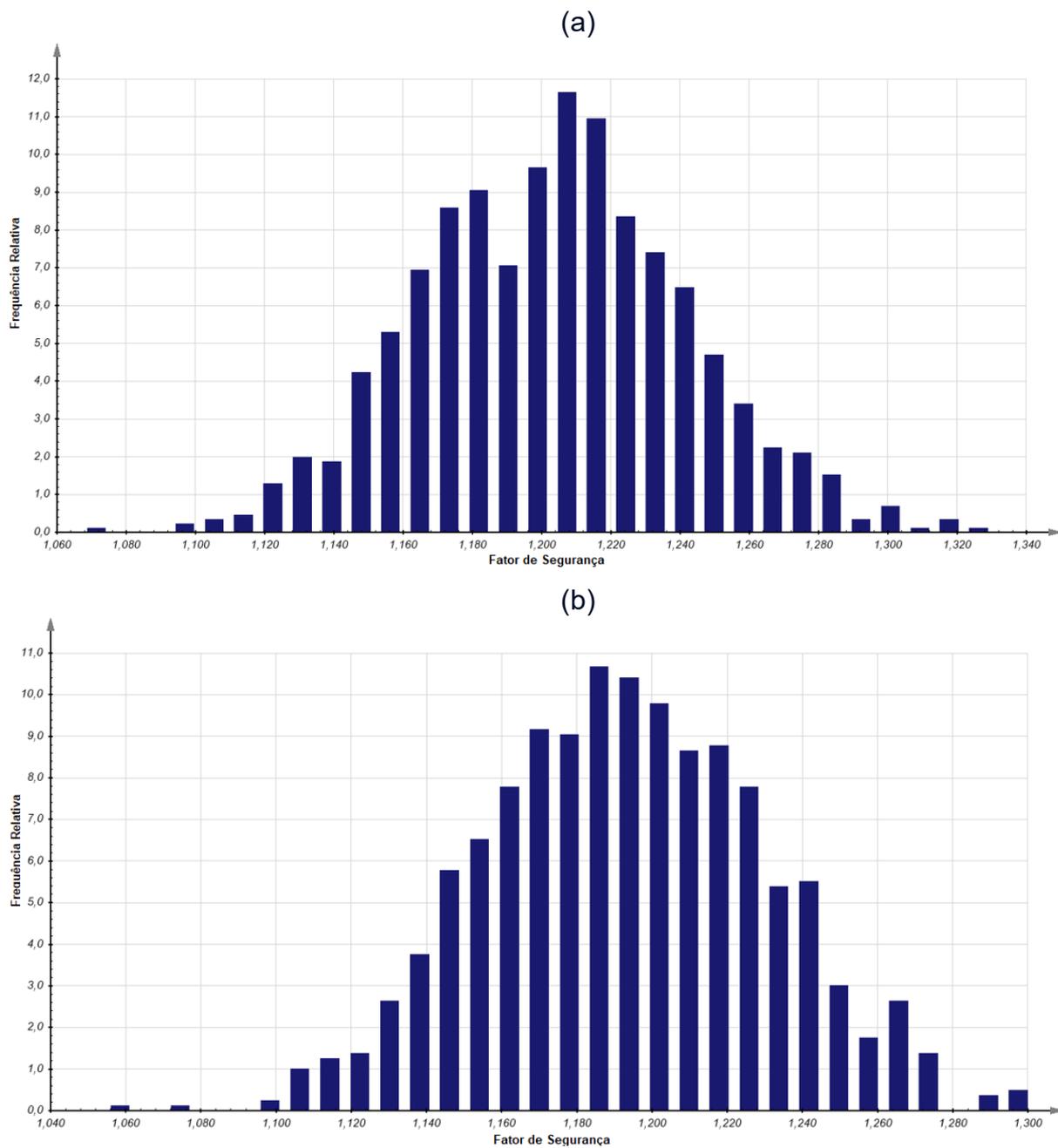


Figura 61 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating)



A Tabela 21 apresenta os resultados para a inclinação de talude 1(V):2(H).

Tabela 21 – Talude 1(V):2(H)

Simulação	Propriedade do material								Resultados - FIXED							Resultados - FLOATING	
	φ (graus)		C (KN/m²)		γ (KN/m³)		Θ		Análise de estabilidade							Análise de estabilidade	
	Valor	COV	Valor	COV	Valor	COV	v	h	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE	FS - Fellenius	PF (%)
S0	30	0	5	0	19	0	0	0	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	-	-
S1	30	0,05	5	-	19	-	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S2	30	0,05	5	-	19	-	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S3	30	0,05	5	-	19	-	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S4	30	0,05	5	-	19	-	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S5	30	0,05	5	-	19	-	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S6	30	0,15	5	-	19	-	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S7	30	0,15	5	-	19	-	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S8	30	0,15	5	-	19	-	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S9	30	0,15	5	-	19	-	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S10	30	0,15	5	-	19	-	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S11	30	-	5	0,5	19	-	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S12	30	-	5	0,5	19	-	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S13	30	-	5	0,5	19	-	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S14	30	-	5	0,5	19	-	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S15	30	-	5	0,5	19	-	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S16	30	-	5	0,2	19	-	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S17	30	-	5	0,2	19	-	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S18	30	-	5	0,2	19	-	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S19	30	-	5	0,2	19	-	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S20	30	-	5	0,2	19	-	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S21	30	-	5	-	19	0,07	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S22	30	-	5	-	19	0,07	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S23	30	-	5	-	19	0,07	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S24	30	-	5	-	19	0,07	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S25	30	-	5	-	19	0,07	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S26	30	-	5	-	19	0,03	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S27	30	-	5	-	19	0,03	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S28	30	-	5	-	19	0,03	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S29	30	-	5	-	19	0,03	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S30	30	-	5	-	19	0,03	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S31	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S32	30	0,05	5	0,2	19	0,03	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S33	30	0,05	5	0,2	19	0,03	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S34	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S35	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S36	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S37	30	0,15	5	0,2	19	0,03	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S38	30	0,15	5	0,2	19	0,03	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S39	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S40	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S41	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S42	30	0,05	5	0,5	19	0,03	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S43	30	0,05	5	0,5	19	0,03	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S44	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S45	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S46	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S47	30	0,05	5	0,2	19	0,07	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S48	30	0,05	5	0,2	19	0,07	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S49	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S50	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S51	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S52	30	0,15	5	0,5	19	0,03	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S53	30	0,15	5	0,5	19	0,03	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S54	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S55	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S56	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S57	30	0,05	5	0,5	19	0,07	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S58	30	0,05	5	0,5	19	0,07	2	5	1,664	-	1,88	1,752	1,876	1,876	1,876	1,664	-
S59	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S60	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S61	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S62	30	0,15	5	0,5	19	0,07	1	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S63	30	0,15	5	0,5	19	0,07	2	5	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S64	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	10	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-
S65	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	20	1,664	-	1,872	1,75	1,87	1,869	1,869	1,664	-

De forma análoga aos outros taludes, também para o talude 1(V):2(H) buscou-se um comparativo direto entre métodos de busca de superfície fixa (fixed) e flutuante (floating), conforme apresentadas na Figura 62 e na Figura 63. A Figura 62a apresenta o resultado de output do software para superfície de falha, fator de segurança, probabilidade entre outras informações para a simulação S32 realizada para a condição fixed. Já a Figura 62b ilustra a saída do software para o mesmo conjunto de parâmetros, porém na condição de busca floating. A Figura 63 apresenta os histogramas de FS obtidos.

A partir destas figuras também se conclui, assim como no talude 1(V):1(H), que apesar dos diferentes sistemas de busca da superfície de falha o resultado obtido para a superfície crítica é bastante similar (Figura 62). No entanto a plotagem dos histogramas (Figura 63) revela uma maior dispersão para a modelagem considerando a superfície flutuante o que resulta em uma probabilidade de falha maior nesse caso, embora os valores médios de FS sejam similares.

Figura 62 – Simulação S32 – inclinação 1(V):2(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating)

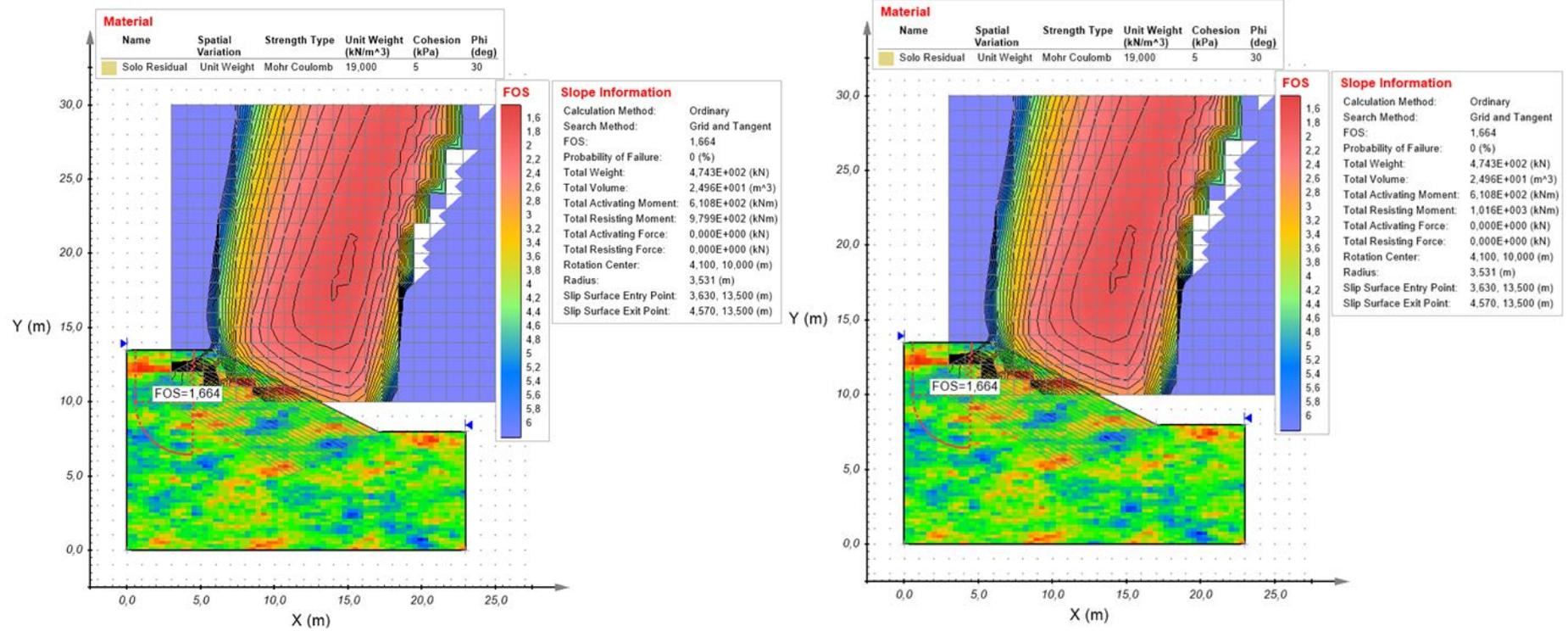
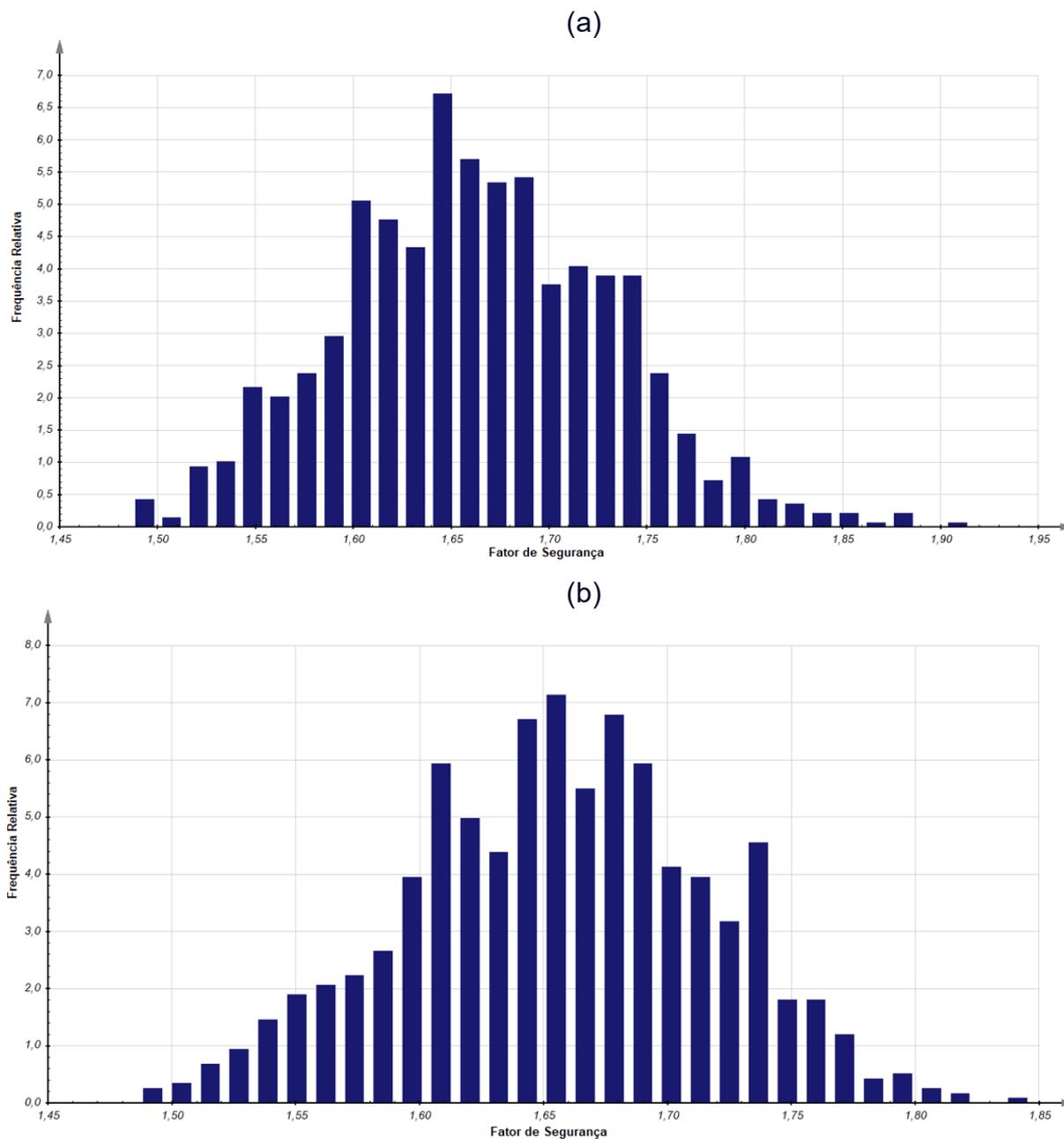


Figura 63 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating)



5.4 Análise de probabilidade considerando o Método de Monte Carlo e campo homogêneo

Foi também realizada análise probabilística considerando campo homogêneo. Neste caso não é considerada a escala de flutuação nas simulações. A Tabela 22 apresenta os resultados para a inclinação de talude 1(V):1(H), na condição fixed. Na referida tabela observa-se que os fatores de segurança variaram de 0,915 a 0,963,

com valores médios de 0,944. Em relação a probabilidade de falha foram observadas probabilidades de 68,2% a 100%, ou seja, probabilidades de falha altas.

Tabela 22 – Resumo dos resultados

Simulação	Propriedade do material									CAMPO HOMOGÊNEO						
	ϕ (graus)			C (KN/m ²)			γ (KN/m ³)			Análise de estabilidade						
	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE
S1	30	0,05	normal	5	-	-	19	-	-	0,919	96,5	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S6	30	0,15	normal	5	-	-	19	-	-	0,919	74,4	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S11	30	-	-	5	0,5	lognormal	19	-	-	0,915	78,2	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959
S16	30	-	-	5	0,2	lognormal	19	-	-	0,915	93,3	0,963	0,907	0,959	0,959	0,959
S21	30	-	-	5	-	-	19	0,07	normal	0,919	100	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S26	30	-	-	5	-	-	19	0,03	normal	0,919	100	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S31	30	0,05	normal	5	0,2	lognormal	19	0,03	normal	0,919	87,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S36	30	0,15	normal	5	0,2	lognormal	19	0,03	normal	0,919	71,9	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S41	30	0,05	normal	5	0,5	lognormal	19	0,03	normal	0,919	82,2	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S46	30	0,05	normal	5	0,2	lognormal	19	0,07	normal	0,919	86,7	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S51	30	0,15	normal	5	0,5	lognormal	19	0,03	normal	0,919	72,8	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S56	30	0,05	normal	5	0,5	lognormal	19	0,07	normal	0,919	81,3	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957
S61	30	0,15	normal	5	0,5	lognormal	19	0,07	normal	0,919	68,2	0,961	0,911	0,958	0,957	0,957

Para fins comparativos, na Tabela 23 apresenta-se o resumo dos resultados, demonstrando-se o fator de segurança para a simulação determinística (Simulação S0), e os fatores de segurança e probabilidades de falha para o probabilístico aleatório (condições fixed e floating) e probabilístico homogêneo, para as escalas de flutuação verticais de 0,5 m e horizontais de 5 m. Em relação aos resultados considerando-se a variabilidade espacial os valores dos fatores de segurança permaneceram os mesmos, entretanto, na média, os percentuais de falha reduziram de 96,8% quando considerada a variabilidade espacial para 84,1% considerando-se campos homogêneos. Somente em duas simulações os resultados foram iguais, com PF de 100%.

Tabela 23 – Resumo dos resultados

Simulação	Propriedade do material									CAMPOS ALEATÓRIOS				CAMPO HOMOGÊNEO			
	ϕ (graus)			C (KN/m ²)			γ (KN/m ³)			θ	Resultados - FIXED		Resultados - FLOATING		Análise de estabilidade		
	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	v	h	Análise de estabilidade		Análise de estabilidade			
												FS - Fellenius	PF (%)	FS - Fellenius	PF (%)	FS - Fellenius	PF (%)
S0 - Determinístico	30	-	-	5	-	-	19	-	-	-	-	0,919	-	-	-	-	-
S1	30	0,05	normal	5	-	-	19	-	-	0,5	5	0,919	100,0	0,919	100,0	0,919	96,5
S6	30	0,15	normal	5	-	-	19	-	-	0,5	5	0,919	99,6	0,919	99,9	0,919	74,4
S11	30	-	-	5	0,5	lognormal	19	-	-	0,5	5	0,915	100,0	0,915	100,0	0,915	78,2
S16	30	-	-	5	0,2	lognormal	19	-	-	0,5	5	0,919	100,0	0,919	100,0	0,915	93,3
S21	30	-	-	5	-	-	19	0,07	normal	0,5	5	0,919	100,0	0,919	100,0	0,919	100
S26	30	-	-	5	-	-	19	0,03	normal	0,5	5	0,919	100,0	0,919	100,0	0,919	100
S31	30	0,05	normal	5	0,2	lognormal	19	0,03	normal	0,5	5	0,919	100,0	0,919	100,0	0,919	87,7
S36	30	0,15	normal	5	0,2	lognormal	19	0,03	normal	0,5	5	0,919	97,0	0,919	99,3	0,919	71,9
S41	30	0,05	normal	5	0,5	lognormal	19	0,03	normal	0,5	5	0,919	98,7	0,919	100,0	0,919	82,2
S46	30	0,05	normal	5	0,2	lognormal	19	0,07	normal	0,5	5	0,919	100,0	0,919	100,0	0,919	86,7
S51	30	0,15	normal	5	0,5	lognormal	19	0,03	normal	0,5	5	0,919	92,7	0,919	99,4	0,919	72,8
S56	30	0,05	normal	5	0,5	lognormal	19	0,07	normal	0,5	5	0,919	98,7	0,919	100,0	0,919	81,3
S61	30	0,15	normal	5	0,5	lognormal	19	0,07	normal	0,5	5	0,919	92,7	0,919	99,4	0,919	68,2

Conforme já discutido, no probabilístico homogêneo foram obtidos os menores percentuais de probabilidade de falha, seguido pelo probabilístico aleatório na condição fixed e tendo o probabilístico na condição floating os maiores percentuais de probabilidade de falha.

5.5 Comparação entre o fator de segurança determinístico e o fator de segurança médio

Efetou-se a comparação entre os fatores de segurança determinísticos e médios para o talude 1(V):1(H), na condição fixed, conforme apresentada na Tabela 24. Os fatores de segurança médios podem ser assumidos como a distribuição normal.

Tabela 24 – Comparação entre os fatores de segurança

Simulação	Propriedade do material								FS - condição <i>Fixed</i>	
	ϕ (graus)		C (KN/m ²)		γ (KN/m ³)		Θ		Determinístico	Médio
	Valor	COV	Valor	COV	Valor	COV	v	h	Fellenius	FS - Fellenius
S0	30	0	5	0	19	0	0	0	0,919	-
S1	30	0,05	5	-	19	-	0,5	5	0,919	0,919
S2	30	0,05	5	-	19	-	1	5	0,915	0,915
S3	30	0,05	5	-	19	-	2	5	0,919	0,919
S4	30	0,05	5	-	19	-	0,5	10	0,919	0,919
S5	30	0,05	5	-	19	-	0,5	20	0,919	0,919
S6	30	0,15	5	-	19	-	0,5	5	0,919	0,922
S7	30	0,15	5	-	19	-	1	5	0,919	0,924
S8	30	0,15	5	-	19	-	2	5	0,919	0,925
S9	30	0,15	5	-	19	-	0,5	10	0,915	0,918
S10	30	0,15	5	-	19	-	0,5	20	0,915	0,918
S11	30	-	5	0,5	19	-	0,5	5	0,915	0,906
S12	30	-	5	0,5	19	-	1	5	0,919	0,914
S13	30	-	5	0,5	19	-	2	5	0,919	0,916
S14	30	-	5	0,5	19	-	0,5	10	0,919	0,910
S15	30	-	5	0,5	19	-	0,5	20	0,919	0,910
S16	30	-	5	0,2	19	-	0,5	5	0,919	0,917
S17	30	-	5	0,2	19	-	1	5	0,915	0,914
S18	30	-	5	0,2	19	-	2	5	0,919	0,918
S19	30	-	5	0,2	19	-	0,5	10	0,919	0,917
S20	30	-	5	0,2	19	-	0,5	20	0,919	0,917
S21	30	-	5	-	19	0,07	0,5	5	0,919	0,918
S22	30	-	5	-	19	0,07	1	5	0,919	0,918
S23	30	-	5	-	19	0,07	2	5	0,919	0,918
S24	30	-	5	-	19	0,07	0,5	10	0,919	0,918
S25	30	-	5	-	19	0,07	0,5	20	0,919	0,918

Simulação	Propriedade do material								FS - condição <i>Fixed</i>	
	ϕ (graus)		C (KN/m ²)		γ (KN/m ³)		Θ		Determinístico	Médio
	Valor	COV	Valor	COV	Valor	COV	v	h	Fellenius	FS - Fellenius
S26	30	-	5	-	19	0,03	0,5	5	0,919	0,918
S27	30	-	5	-	19	0,03	1	5	0,919	0,918
S28	30	-	5	-	19	0,03	2	5	0,919	0,918
S29	30	-	5	-	19	0,03	0,5	10	0,919	0,918
S30	30	-	5	-	19	0,03	0,5	20	0,919	0,918
S31	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	5	0,919	0,918
S32	30	0,05	5	0,2	19	0,03	1	5	0,919	0,919
S33	30	0,05	5	0,2	19	0,03	2	5	0,919	0,920
S34	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	10	0,919	0,918
S35	30	0,05	5	0,2	19	0,03	0,5	20	0,919	0,918
S36	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	5	0,919	0,921
S37	30	0,15	5	0,2	19	0,03	1	5	0,919	0,923
S38	30	0,15	5	0,2	19	0,03	2	5	0,919	0,925
S39	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	10	0,919	0,921
S40	30	0,15	5	0,2	19	0,03	0,5	20	0,919	0,921
S41	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	5	0,919	0,910
S42	30	0,05	5	0,5	19	0,03	1	5	0,919	0,915
S43	30	0,05	5	0,5	19	0,03	2	5	0,919	0,918
S44	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	10	0,919	0,911
S45	30	0,05	5	0,5	19	0,03	0,5	20	0,919	0,911
S46	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	5	0,919	0,918
S47	30	0,05	5	0,2	19	0,07	1	5	0,919	0,919
S48	30	0,05	5	0,2	19	0,07	2	5	0,919	0,920
S49	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	10	0,919	0,918
S50	30	0,05	5	0,2	19	0,07	0,5	20	0,919	0,918
S51	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	5	0,919	0,914
S52	30	0,15	5	0,5	19	0,03	1	5	0,919	0,919
S53	30	0,15	5	0,5	19	0,03	2	5	0,919	0,923
S54	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	10	0,919	0,914
S55	30	0,15	5	0,5	19	0,03	0,5	20	0,919	0,915
S56	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	5	0,919	0,910
S57	30	0,05	5	0,5	19	0,07	1	5	0,919	0,915
S58	30	0,05	5	0,5	19	0,07	2	5	0,919	0,918
S59	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	10	0,919	0,911
S60	30	0,05	5	0,5	19	0,07	0,5	20	0,919	0,911
S61	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	5	0,919	0,914
S62	30	0,15	5	0,5	19	0,07	1	5	0,919	0,919
S63	30	0,15	5	0,5	19	0,07	2	5	0,919	0,923
S64	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	10	0,919	0,914
S65	30	0,15	5	0,5	19	0,07	0,5	20	0,919	0,915

A média dos resultados determinísticos é de 0,919 contra 0,917 dos valores médios. Esta proximidade dos resultados é normal, conforme observado em literatura.

Das 65 simulações realizadas, em 42 delas o FS determinístico é maior que o médio e em 14 o resultado é contrário, com 9 simulações resultando no mesmo valor de 0,919.

Entretanto, ao estudarem a estabilidade probabilística de taludes com campos aleatórios com análises 3D, Young et al. (2018) não obtiveram resultados semelhantes, obtendo-se, para a situação modelada, FS determinístico de 1,47 e médio de 1,36.

5.6 Seção estudo de caso – talude de corte do km 362,4 da rodovia estadual SC-108

Neste item são apresentadas as simulações adotando-se as mesmas geometrias de talude da seção anterior, mas agora com os parâmetros geotécnicos obtidos dos ensaios realizados em Cocal do Sul/SC: coesão efetiva média de 11,6 kPa, COV 47,8% e PDF lognormal, ângulo de atrito efetivo médio de 28,1° e COV 15,6%, PDF normal; e peso específico médio de 17,9 kN/m³, COV 4,6%. e PDF normal.

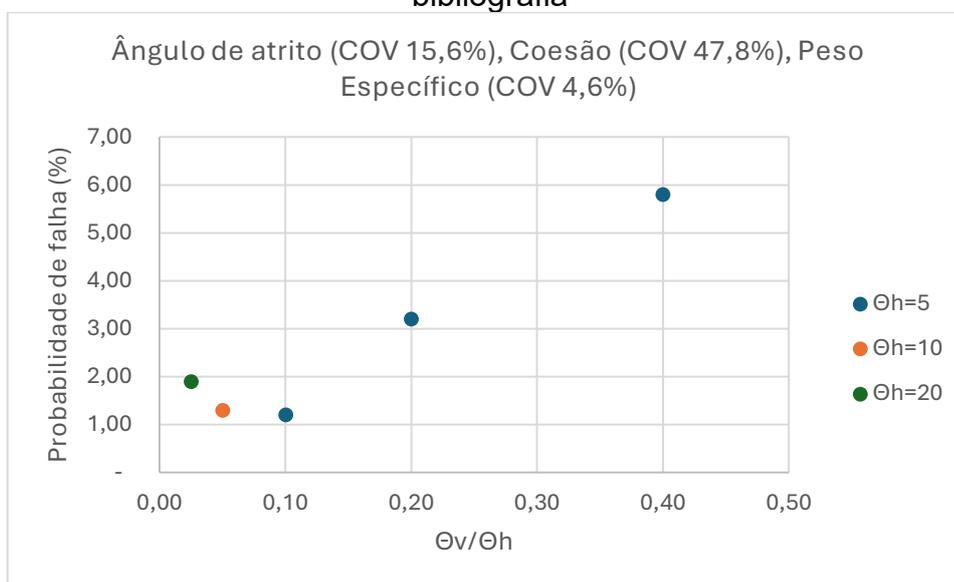
Para as distâncias de correlação foram adotadas 0,5 m, 1 m e 2 m para distâncias de correlação verticais e 5 m, 10 m e 20 m para distâncias de correlação horizontais, valores definidos de acordo com faixa apresentada em literatura. Além destas, para as escalas de flutuação horizontais foram simuladas também os valores 0,25 m, 0,48 m e 0,73 m, conforme apresentados no Capítulo 4.4.1. No total foram avaliadas 14 combinações, sendo uma determinística e 13 considerando a variabilidade.

Para o talude 1(V):1(H) os valores de fator de segurança (FS) obtidos e solo-homogêneo foram de 1,174, para o método de Fellenius, 1,228, para o método de Bishop, 1,162, para o método Janbu, 1,224 para o método Spencer, 1,223 para os métodos Morgenster-Price (MR) e Fredlund (GLE). Valores similares aos médios obtidos na análise probabilística.

Com relação a probabilidade de falha, todas as simulações com escalas de flutuação de bibliografia apresentaram probabilidade acima de zero, variando entre 1,2% e 5,8%, na condição fixed. Em relação às distâncias de correlação modeladas observou-se um incremento da probabilidade de falha com o incremento da relação

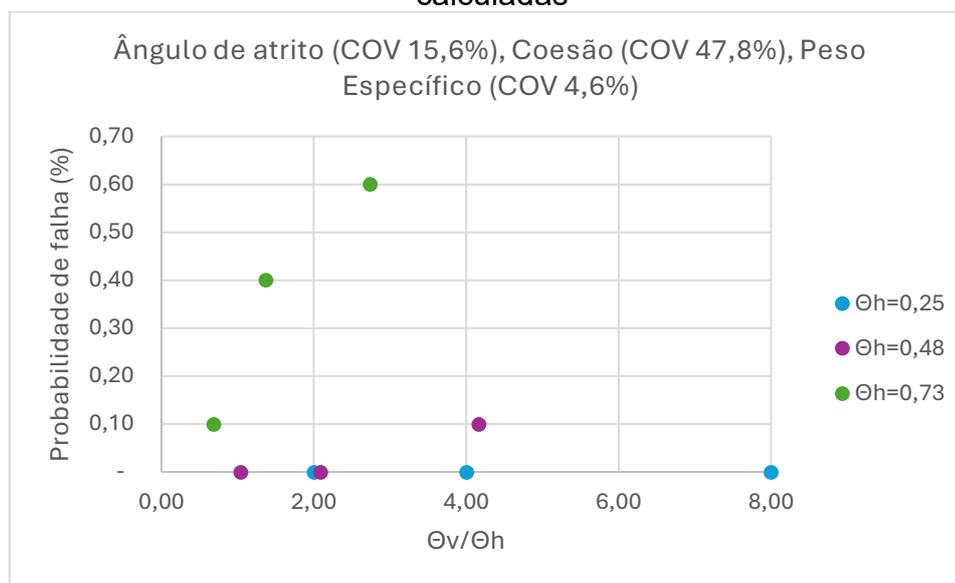
Θ_v/Θ_h (Figura 64). Vale observar que os dados utilizados na Figura 64 foram construídos com variação simultânea dos parâmetros, o que pode justificar a tendência distinta observada na Figura 64 em relação ao observado nas Figuras 55 a 57. Ainda, cabe observar que existe uma forte correlação entre as variações esperadas para o ângulo de atrito e coesão, correlação negativa, ou seja, quando um cresce o outro diminui, conforme o observado no Capítulo 4, item 4.4. Esta correlação não foi considerada nas análises simuladas.

Figura 64 – Probabilidade de falha: talude 1(V):1(H) com escalas de flutuação de bibliografia



As probabilidades de falha determinadas com as escalas horizontais calculadas (inferiores a 1m), quando não nulas, foram inferiores a 1%. Neste caso, não se constatou incremento da probabilidade de falha com o incremento da relação Θ_v/Θ_h apenas para o menor valor de Θ_h (Figura 65).

Figura 65 – Probabilidade de falha: talude 1(V):1(H) com escalas de flutuação calculadas



Na avaliação da condição floating, para as escalas de bibliografia, todos os resultados de probabilidade de falha foram superiores à condição fixed, variando entre 5,0% e 17,1%. Mesma situação para as escalas de flutuação inferiores a 1m, quando não nulas, com PF de até 3,4%.

A Tabela 25 apresenta os resultados para a inclinação de talude 1(V):1(H).

Tabela 25 – Talude 1:1

Simulação	Propriedade do material									Resultados - FIXED							Resultados - FLOATING			
	φ (graus)			C (KN/m ²)			γ (KN/m ³)			θ		Análise de estabilidade							Análise de estabilidade	
	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	θ _v	θ _h	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE	FS - Fellenius	PF (%)
S0	28,1	0		11,6	0	-		0	-	0	0	1,174	-	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	-	-
S1	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	5	1,174	1,2	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	5,0
S2	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	5	1,174	3,2	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	11,2
S3	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	5	1,174	5,8	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	17,1
S4	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	10	1,174	1,3	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	5,9
S5	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	20	1,174	1,9	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	7,2
S6	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,25	1,174	-	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	-
S7	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,48	1,174	-	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	0,1
S8	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,73	1,174	0,1	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	0,2
S9	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,25	1,174	-	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	-
S10	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,48	1,174	-	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	0,3
S11	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,73	1,174	0,4	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	1,8
S12	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,25	1,174	-	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	0,1
S13	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,48	1,174	0,1	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	1,4
S14	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,73	1,174	0,6	1,228	1,162	1,224	1,223	1,223	1,174	3,4

A Figura 66 apresenta a simulação S3 realizada para a condição fixed e a Figura 67 o respectivo histograma do fator de segurança.

Figura 66 – Simulação S3 – inclinação 1(V):1(H): (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de procura flutuante (floating)

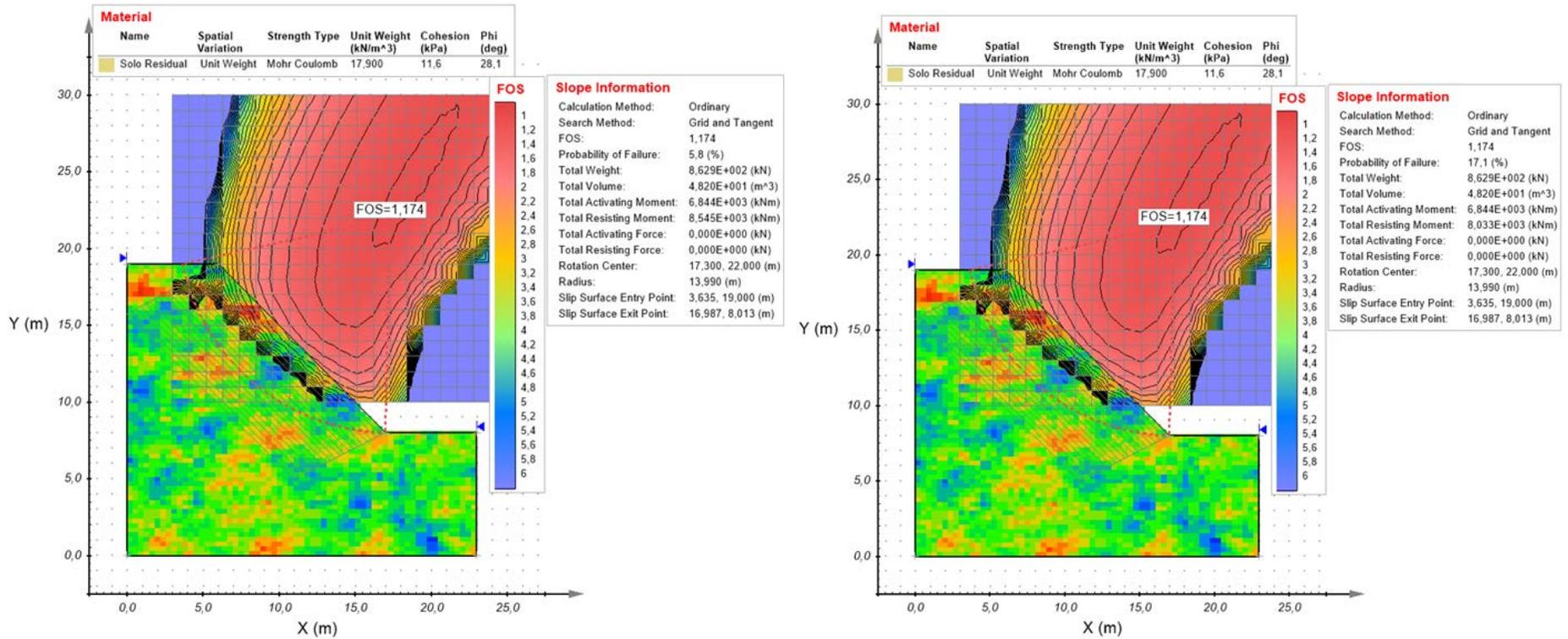
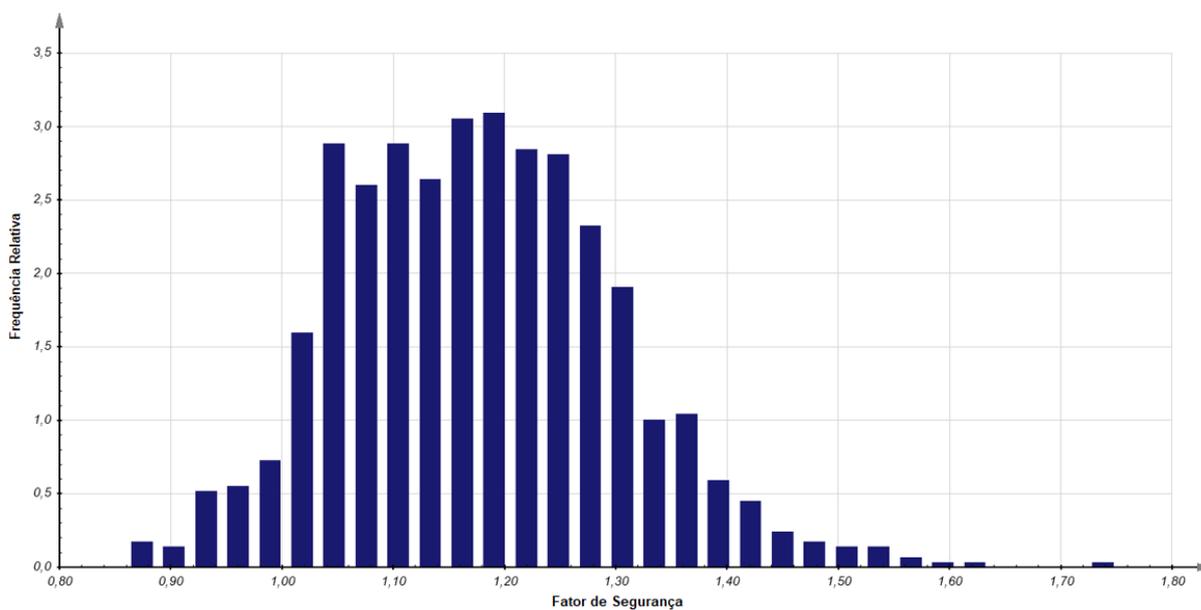
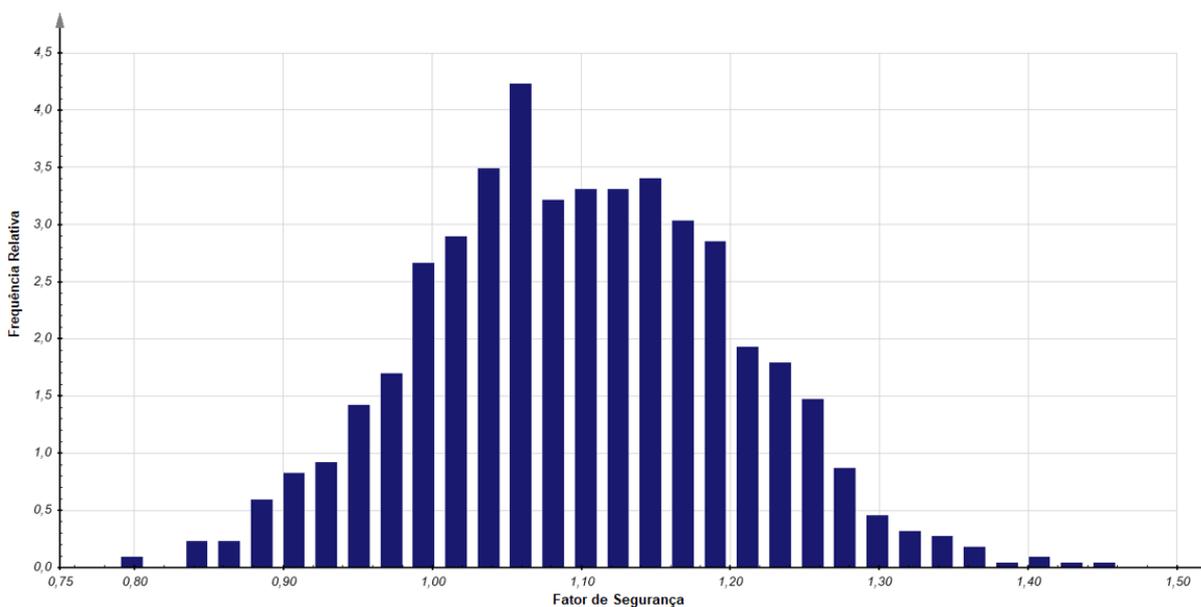


Figura 67 – Histograma do fator de segurança (a) condição de busca fixa (fixed) e (b) condição de busca flutuante (floating)

(a)



(b)



Para o talude 1(V):1,5(H) os valores de fator de segurança (FS) obtidos e solo-homogêneo foram de 1,533, para o método de Fellenius, 1,612, para o método de Bishop, 1,509, para o método Janbu, 1,607 para os métodos Spencer, Morgenster-Price (MR) e Fredlund (GLE).

Com relação a probabilidade de falha, somente uma simulação não apresentou resultado nulo, conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Talude 1(V):1,5(H)

Simulação	Propriedade do material										Resultados - FIXED								Resultados - FLOATING				
	φ (graus)			C (KN/m²)			γ (KN/m³)			Θ		Análise de estabilidade								Análise de estabilidade			
	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Θv	Θh	FS	Pf (%)	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE	FS - Fellenius	PF (%)	
S0	28,1	0		11,6	0	-		0	-	0	0	1,607		1,533		1,612	1,509	1,607	1,607	1,607			
S1	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	5	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S2	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	5	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S3	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	5	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	0,1
S4	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	10	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S5	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	20	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S6	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,25	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S7	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,48	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S8	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,73	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S9	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,25	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S10	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,48	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S11	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,73	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S12	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,25	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S13	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,48	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-
S14	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,73	1,607	-	1,533	-	1,612	1,509	1,607	1,607	1,607		1,533	-

Para o talude 1(V):2(H) os valores de fator de segurança (FS) obtidos e solo-homogêneo foram de 2,127, para o método de Fellenius, 2,414, para o método de Bishop, 2,217, para o método Janbu, 2,410 para o método Spencer e 2,409 para os métodos Morgenster-Price (MR) e Fredlund (GLE).

Não há probabilidade de falha para este talude, conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Talude 1(V):2(H)

Simulação	Propriedade do material										Resultados - FIXED								Resultados - FLOATING				
	φ (graus)			C (KN/m²)			γ (KN/m³)			Θ		Análise de estabilidade								Análise de estabilidade			
	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Valor	COV	PDF	Θv	Θh	FS	Pf (%)	Fellenius	PF (%)	Bishop	Janbu	Spencer	MP	GLE	FS - Fellenius	PF (%)	
S0	28,1	0		11,6	0	-		0	-	0	0	2,409		2,127		2,414	2,217	2,41	2,409	2,409			
S1	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	5	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S2	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	5	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S3	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	5	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S4	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	10	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S5	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	20	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S6	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,25	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S7	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,48	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S8	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	0,5	0,73	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S9	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,25	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S10	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,48	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S11	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	1	0,73	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S12	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,25	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S13	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,48	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-
S14	28,1	0,156	normal	11,6	0,478	lognormal	17,9	0,046	normal	2	0,73	2,409	-	2,127	-	2,414	2,217	2,41	2,409	2,409		2,127	-

5.7 Considerações sobre a probabilidade de falha

O caso da obra de aumento de capacidade da rodovia SC-108 pode ser tratado na condição: “corte extenso a ser construído em rodovia interestadual”, de acordo com proposta de Satamarina et al. (1992). Apesar de tratar-se de rodovia estadual, esta rodovia possui um elevado volume de tráfego, cujo percentual de falha

aceitável então é menor que 0,01%. Neste sentido, a Tabela 28 apresenta os percentuais de simulações com probabilidade de falha superiores a 0,01%, para cada talude. Nesse sentido, visando atender o critério de probabilidade de falha a seção de corte a ser utilizada deveria ser construída com inclinação de 1:2, haja vista a probabilidade de falha ser nula para todas as simulações efetuadas.

Tabela 28 – Probabilidades de falha para cada simulação

TALUDE	CONDIÇÃO	SIMULAÇÕES COM PF > 0,01%
1(V):1(H)	Fixed	57% (8 de 14)
	Floating	86% (12 de 14)
1(V):1,5(H)	Fixed	0% (0 de 14)
	Floating	7% (1 de 14)
1(V):2(H)	Fixed	0% (0 de 14)
	Floating	0% (0 de 14)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O presente trabalho objetivou a caracterização da variabilidade dos parâmetros geotécnicos de um solo residual de granito na região de Cocal do Sul/SC, com ênfase para os parâmetros de resistência, ângulo de atrito e coesão, e peso específico natural. Visando uma caracterização rigorosa da variabilidade definiu-se uma investigação em uma área de 1,15m x 1,15 m, com amostragem de 40 moldes indeformados, os quais foram agrupados para determinação de 10 envoltórias de ruptura através da execução de ensaios de cisalhamento direto. Os valores obtidos para ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva, considerando valores de pico, resultaram em coeficientes de variação de 15,5% e 48,1%, respectivamente, demonstrando, desta forma, a grande variabilidade mesmo para uma pequena área de abrangência.

Além da variabilidade representada através de valores médios e desvio padrão dos parâmetros de interesse foram construídos histogramas das distribuições dos parâmetros e analisada a aderência das distribuições às funções teóricas, lognormal e normal. Apesar do número limitado de dados obtidos a partir das 10 envoltórias não foi possível rejeitar a hipótese de que os dados, ângulo de atrito e coesão possuem distribuição normal. Quando avaliados o peso específico e ângulo secante o número superior de amostras, 40 unidades, permite uma maior confiabilidade nas análises de aderência as funções teóricas. Nesses casos, também foi observado que não há evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados.

Em relação a distribuição espacial dos parâmetros foi possível estabelecer através do Método Expedito de Vanmarke (MEV) escalas de flutuação horizontal da ordem de 0,23 m a 0,73 m. As escalas de flutuação horizontais calculadas no presente estudo apresentaram resultados bem inferiores às escalas de bibliografia.

Em relação às análises de estabilidade probabilísticas realizadas o estudo demonstrou que, apesar dos fatores de segurança determinísticos e probabilísticos (FS médios) permanecerem similares, a consideração da variabilidade incorpora um novo elemento nas análises de estabilidade que é a probabilidade de falha,

relacionando o número de análises com fatores de segurança inferiores a 1 com o número de análises efetuadas, demonstrando a importância da consideração da variabilidade nos estudos de estabilidades de taludes. Já quando considerada a variabilidade espacial x variabilidade em campo homogêneo, verificou-se que campos com variação espacial apresentaram de forma geral probabilidades maiores.

Embora a sondagem mista realizada no km 362,4 tenha apresentado uma camada de solo de apenas 2,50 m de profundidade, a região do Contorno de Cocal do Sul possui camadas de solo mais profundas, conforme demonstradas nas sondagens a trado realizadas pela empresa Iguatemi Engenharia, quando da elaboração do projeto. Nesse sentido, os resultados apresentados no presente trabalho podem ser utilizados para nortear a verificação da estabilidade de seções ao longo do trecho, não excluindo a necessidade de realização de investigação complementar dos trechos a serem avaliados.

Por fim, conclui-se que este estudo, realizado para o projeto de implantação de uma obra de infraestrutura, no caso uma rodovia, é válido também para quaisquer outros tipos de obras que envolvam a escavação de taludes.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- a coleta de amostras indeformadas e a realização de ensaios em profundidade com o intuito de caracterizar a escala de flutuação vertical;
- a análise de probabilidade utilizando elementos finitos com campo aleatório (RFEM);
- a utilização de diferentes métodos para geração de campos aleatórios e análise de influência destes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULAI, M.; SHARIFZADEH M. **Probability Methods for Stability Design of Open Pit Rock Slopes: An Overview**. Geosciences, 2021.

ALAMANIS, N.; DAKOULAS, P. **Simulation of random fields of soil properties by the local average subdivision method and engineering applications**. Energy Syst, 2021.

BAECHER, G.B.; CHRISTIAN, J.T. **Reliability of slopes: Incorporating Qualitative Information**. *Transportation Research Record 1343*. Canada, 2003.

BILESKY G.F.; HACHICH, W.C. **Efeito da Estrutura de Correlação Espacial no Dimensionamento de um Aterro Sobre Solo Mole por Método de Equilíbrio Limite**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, 2018.

BOLTON M. **The Strength and Dilatancy of Sands**. *Geotechnique*, 36(1), p. 65-78, 1986.

Branco, L.C.P.D. **Aplicação de Conceitos de Fiabilidade a Solos Residuais**. Dissertação de Mestrado, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 141 p., 2011.

CAMI, B.; JAVANKHOSHDEL S.; PHOON K.K.; Ching J. **Scale of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values**. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, 2020.

CAMPELLO, I.C.; GARDONI M.G.; PIMENTEL K.C.A.; ASSIS A. **Variabilidade de Propriedades Geotécnicas**. XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Salvador, 2019.

CAO, Z.; WANG, Y.; LI, D. **Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis**. Berlin Heidelberg: Springer, 2017.

CHO, S.E.; CHRISTIAN, J.T. **Effects of spatial variability of soil properties on slope stability**. Science Direct, South Korea, 2007.

DYSON, A.P.; TOLLOIYAN, A. **Probabilistic Investigation of RFEM Topologies for Slope Stability Analysis**. *Computers and Geotechnics*, v. 114, 2019.

ELKATEB, T.; CHALATURNYK R.; ROBERTSON, P.K. **An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems**. Canada, 2002.

EL-RAMLY H.; MORGENSTER N.R.; CRUDEN D.M. **Probabilistic Slope Stability Analysis for Practice**. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002.

FENTON, G.A.; GRIFFITHS, D.V. **Risk Assessment in Geotechnical Engineering**. New Jersey, 2018.

FENTON, G.A.; VANMARCKE, E.H. **Simulation of Random Fields Via Local Average Subdivision**. Journal of Engineering Mechanics, v.116, p 1773-1749, 1990.

FISHMAN G.S. **Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications**. Nova York: Springer-Verlag, 1995.

FORREST, W.; ORR, T. **Reability of Shallow Foundations Designed to Eurocode 7**. Georisk, 2010.

FUTAI, M. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçoramento**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, 2002.

GHASEMI A.; ZAHEDIAS S. **Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians**. International Journal of Endocrinology and Metabolism, p.486-489, 2012.

GIBSON, R.E.; HENKEL, D.J. **Influence of Duration of Tests Constant Rate of Strain on Measured “Drained” Strenght**. Géotechnique, v.4, n.1, p. 6-15, 1954.

HUANG, W.; DIJKSTRA T.; LOVERIDGE, F.; HUGHES, P.; BLAKE, A.P.; DOBBS, M.; GONZALES, Y.T. **Spatial Variability of London Clay Using CPT and SPT Data**. 8th International Symposium of Geotechnical Safety and Risk. Singapore, 2022.

Iguatemi – Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. **Projeto de Engenharia Rodoviária de Obras de Reabilitação com Aumento de Capacidade (Duplicação)**. Florianópolis, 2021.

JHA S.K.; CHING J. **Simplified Reliability Method for Spatially Variable Undrained Engineered Slopes**. Soils and Foundations. Elsevier BV, v. 53, n. 5, p. 708-719, 2013.

KENARSARI A.; CHENARI, R. J.; ESLAMI, A. **Characterization of the Correlation Structure of Residual CPT Profiles in Sand Deposits**. International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering Vol. 11, 2013.

LACASSE, S.; NADIM, F. **Risk and Reliability in Geotechnical Engineering**. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Missouri, 1998.

LI, K.S.; LUMB, P. **Probabilistic Design of Slopes**. Geotech. J., 24, p 520-531. Canada, 1997.

LI, Y.; QUIAN C.; ZHANG B.; XU N. **Reliability and Landslide Consequence Analysis of Long Heterogeneous Soil Infrastructure Slopes: A Parallel Computing Investigation**. Reliability Engineering & System Safety, In Press, Journal Pre-Proof, 2024.

NG, C.; QU, C.; NI, J.; GUO, H. **Three-Dimensional Reliability Analysis of Unsaturated Soil Slope Considering Permeability Rotated Anisotropy Random Field**. Computers and Geotechnics, v.151, 104944, 2022.

PHOON, K.K.; CHING, J. **Risk and Reliability in Geotechnical Engineering**. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 9781482227215, 2015.

PHOON, K.K.; KULHAWY, F.H. **Characterization of Geotechnical Variability**. Can. Geotech J.. Canada, 1999.

PHOON, K.K.; RETIEF, J. **Reliability of Geotechnical Structures in ISO 2394**. Boca Raton, FL: CRC Press. London, UK, 2016.

SANTAMARINA, J.C.; ALTSCHAEFFL, A.G.; CHAMEAU J.L. **Reliability of Slopes: Incorporating Qualitative Information**. Transportation Research Record 1343, 1992.

UZIELLI. M.; LACASSE. S.; NADIM F.; PHOON. K. K. **Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice**. International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. Singapura, 2006.

VANMARCKE, E. **Random fields, analysis and synthesis**. Cambridge, Mass: MIT Press. ISBN 0262220261, 1983.

VIVIESCAS, J.C.; GRIFFITHS D.V.; OSORIO, J.P. **Geological influence on the spatial variability of soils**. International Journal of Geotechnical Engineering, 2021.

WHITE, D.J. et al. **Innovative Solutions for Slope Stability Reinforcement and Characterization**. Center for Transportation Research and Education Iowa State University, 2005.

WICKREMESINGHE, D.; CAMPANELLA, R.G. **Scale of Fluctuation as a Descriptor of Soil Variability**. Prob. Methods in Geotech. Rotterdam. p. 233-239, 1993.

WU, C.; WANG, Z.Z.; GOH, S.H.; ZHANG, W. **Comparing 2D and 3D Slope Stability in Spatially Variable Soil Using Random Finite-Element Method**. Computer and Geotechnics 170, 2024.

YOUNG, L. et al. **Probabilistic Stability Analyses of Undrained Slopes by 3D Random Fields and Finit Element Methods**. Geoscience Frontiers, p.1657-1664, 2018.

ZHOU A.; CHRISTIAN, J.T. **A Monte Carlo Approach to Estimate the Stability of Soil-Rock Slopes Considering the Non-Uniformity of Materials**. Symmetry, 2020.

ZHU H.; GRIFFITHS D.V.; FENTON G.A.; ZHANG L.M. **Undrained Failure Mechanisms of Slopes in Random Soil**. Engineering Geology, v. 191, p. 31-35, 2015.

APÊNDICE A

Figura 68 – Ensaio de cisalhamento complementar 2

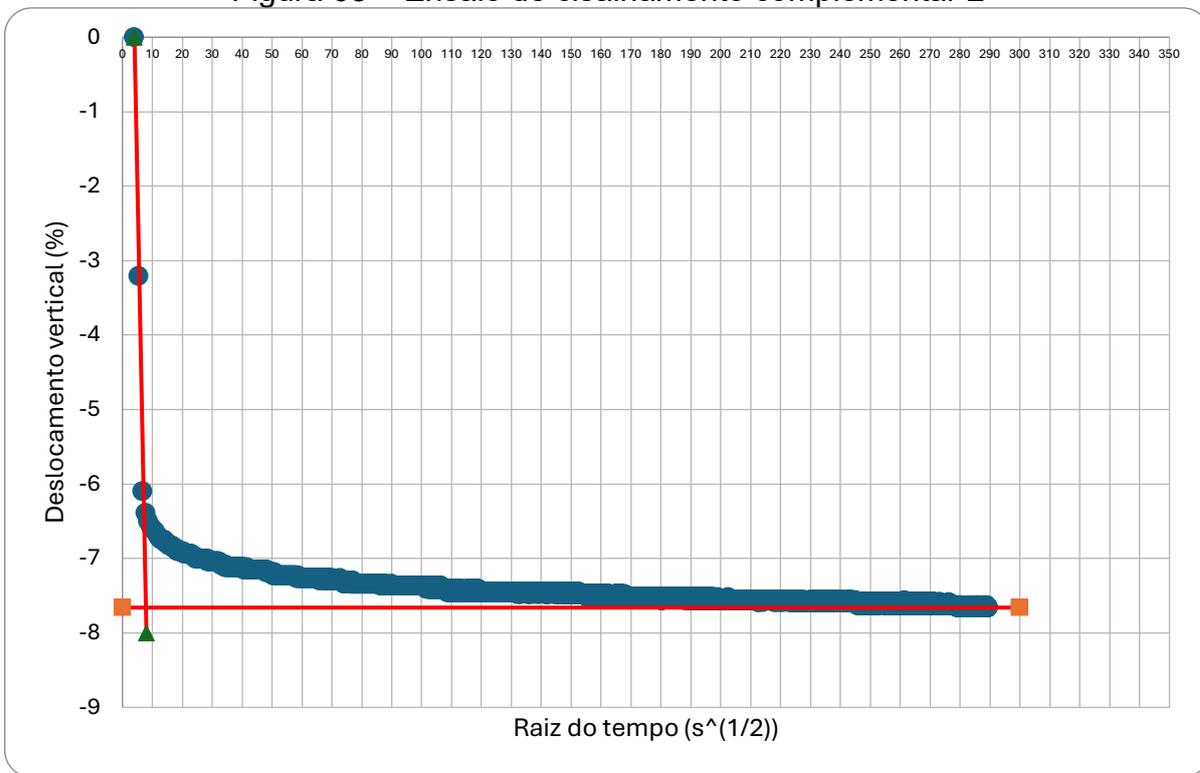


Figura 69 – Ensaio de cisalhamento complementar 3

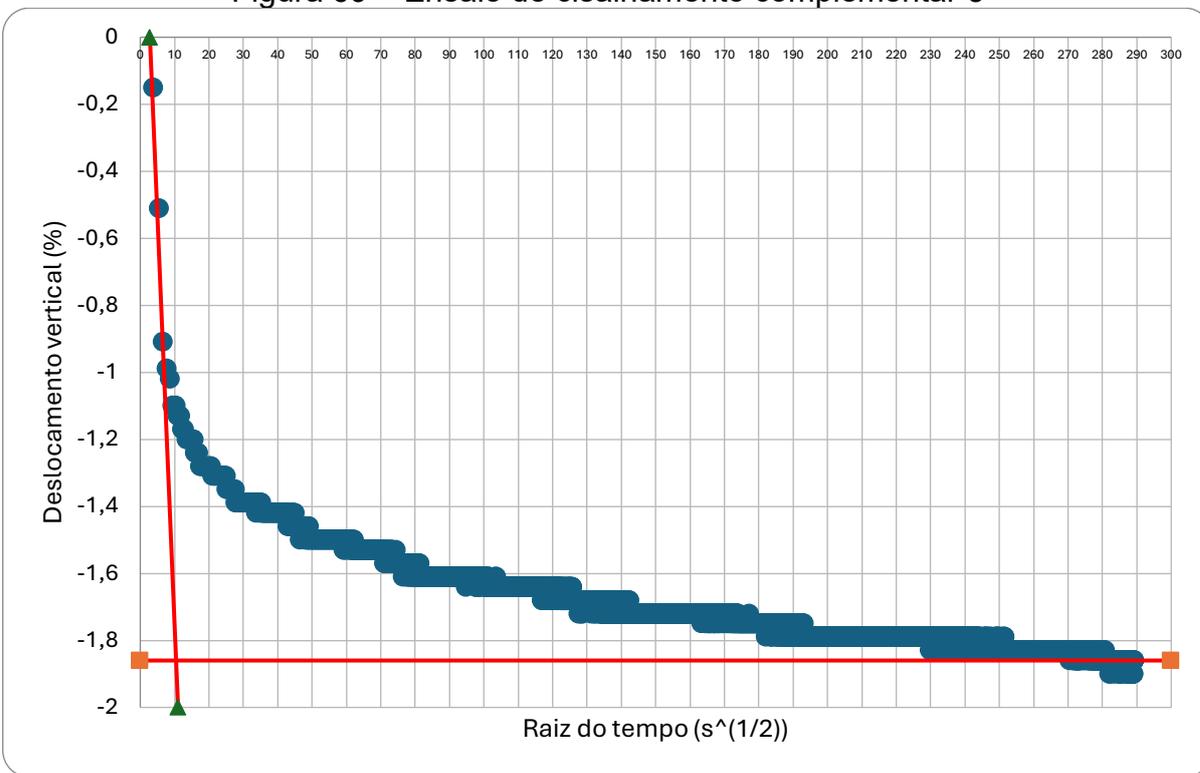


Figura 70 – Ensaio de cisalhamento complementar 4

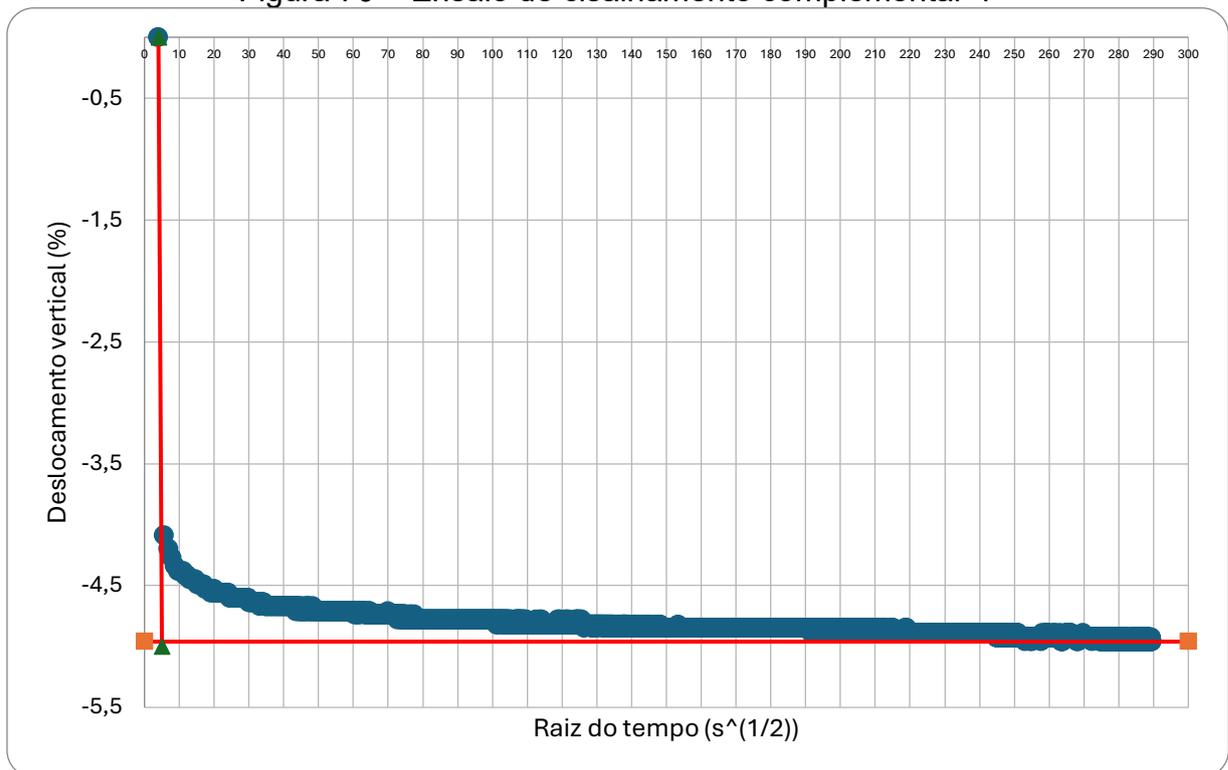


Figura 71 – Ensaio de cisalhamento complementar 5

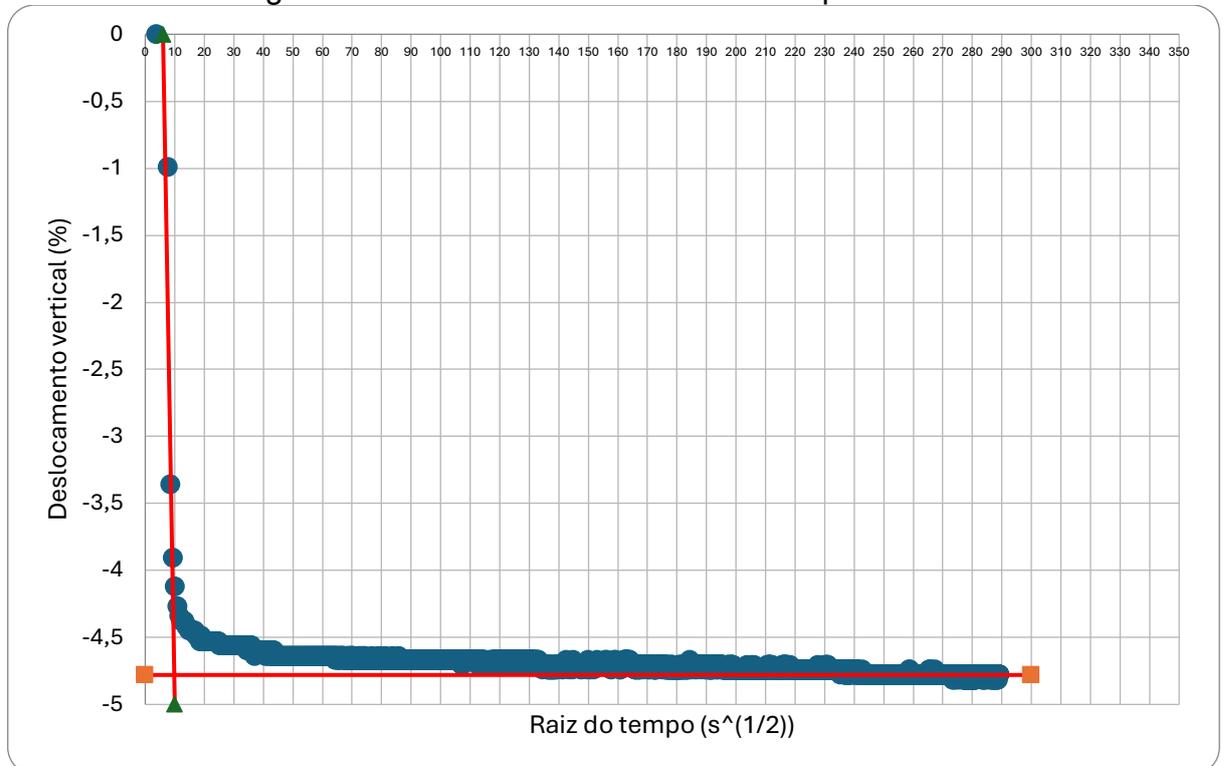
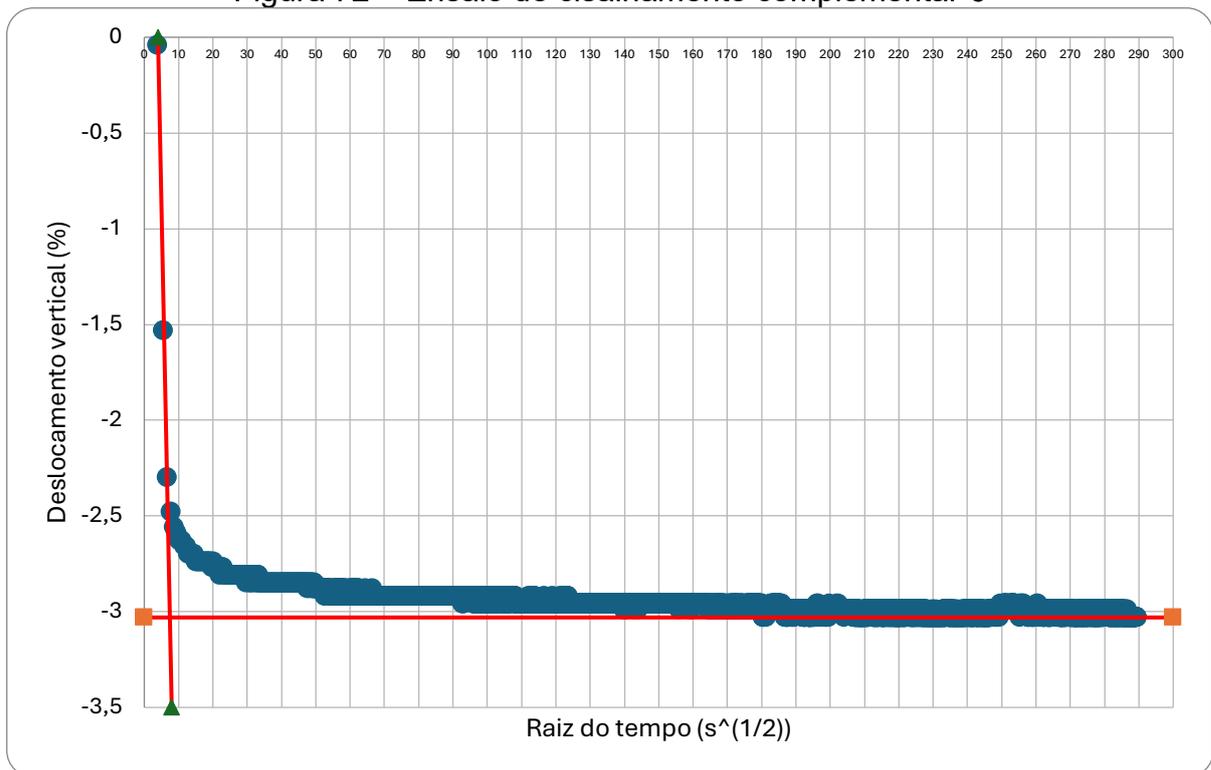
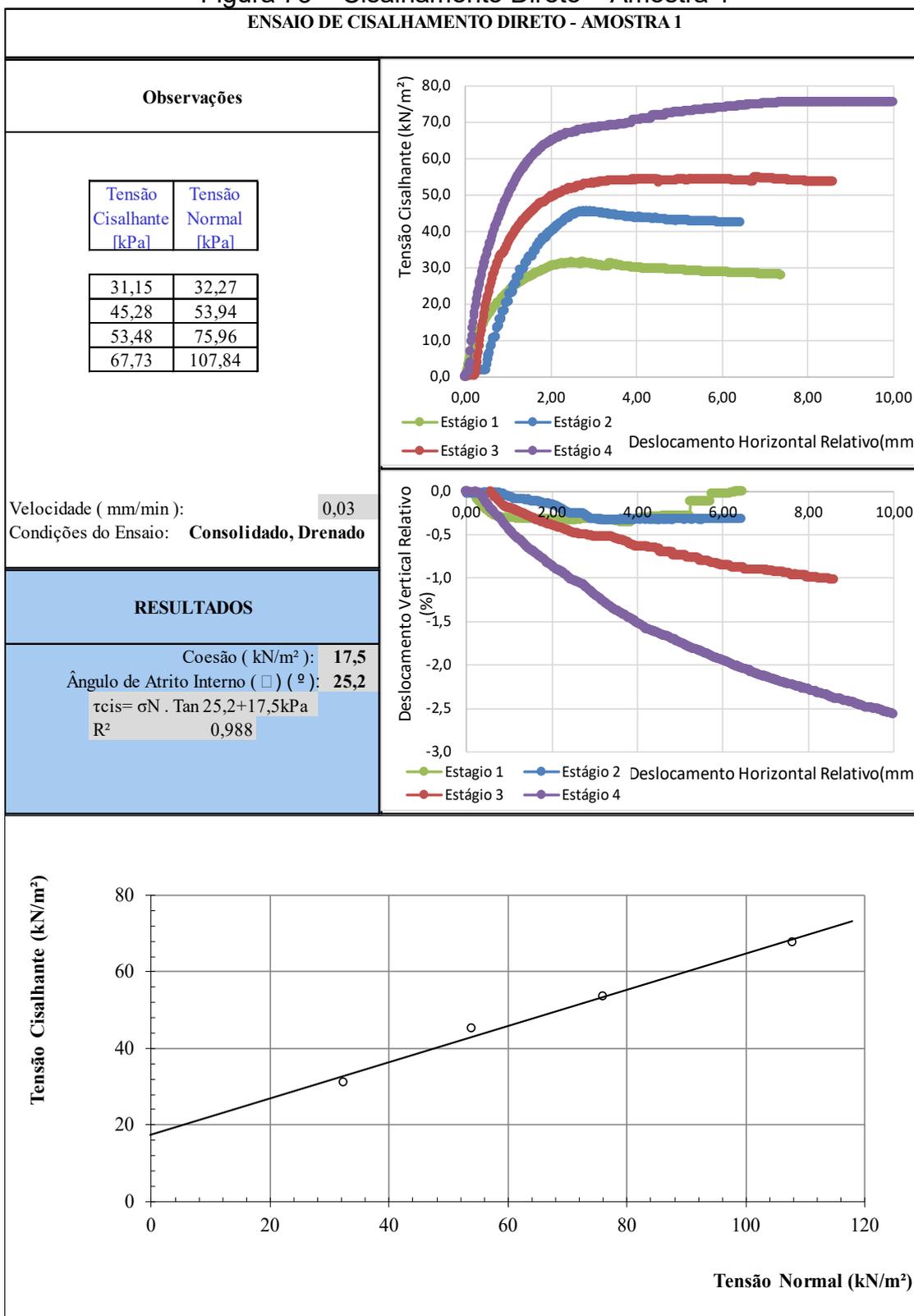


Figura 72 – Ensaio de cisalhamento complementar 6



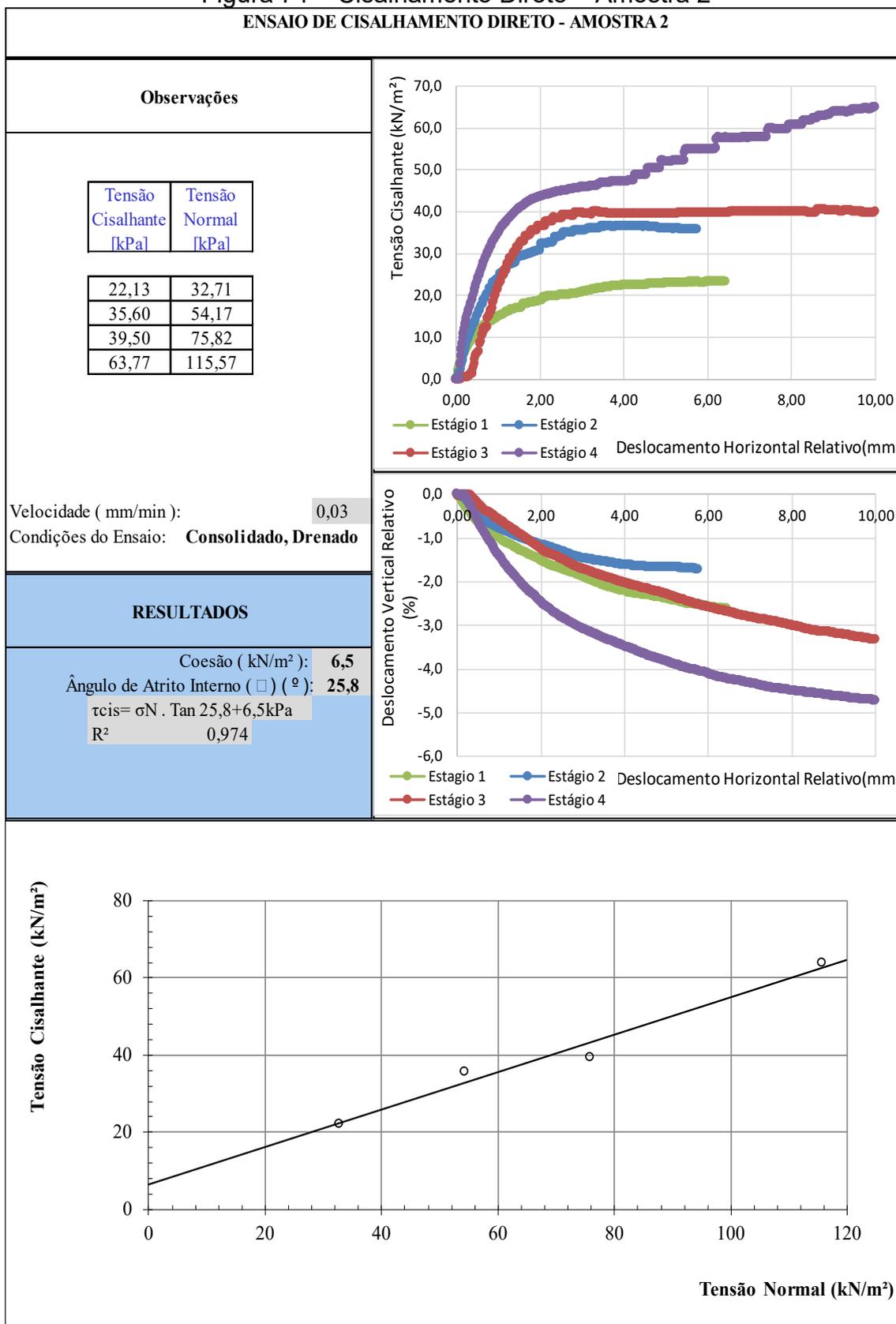
ANEXO A

Figura 73 – Cisalhamento Direto – Amostra 1



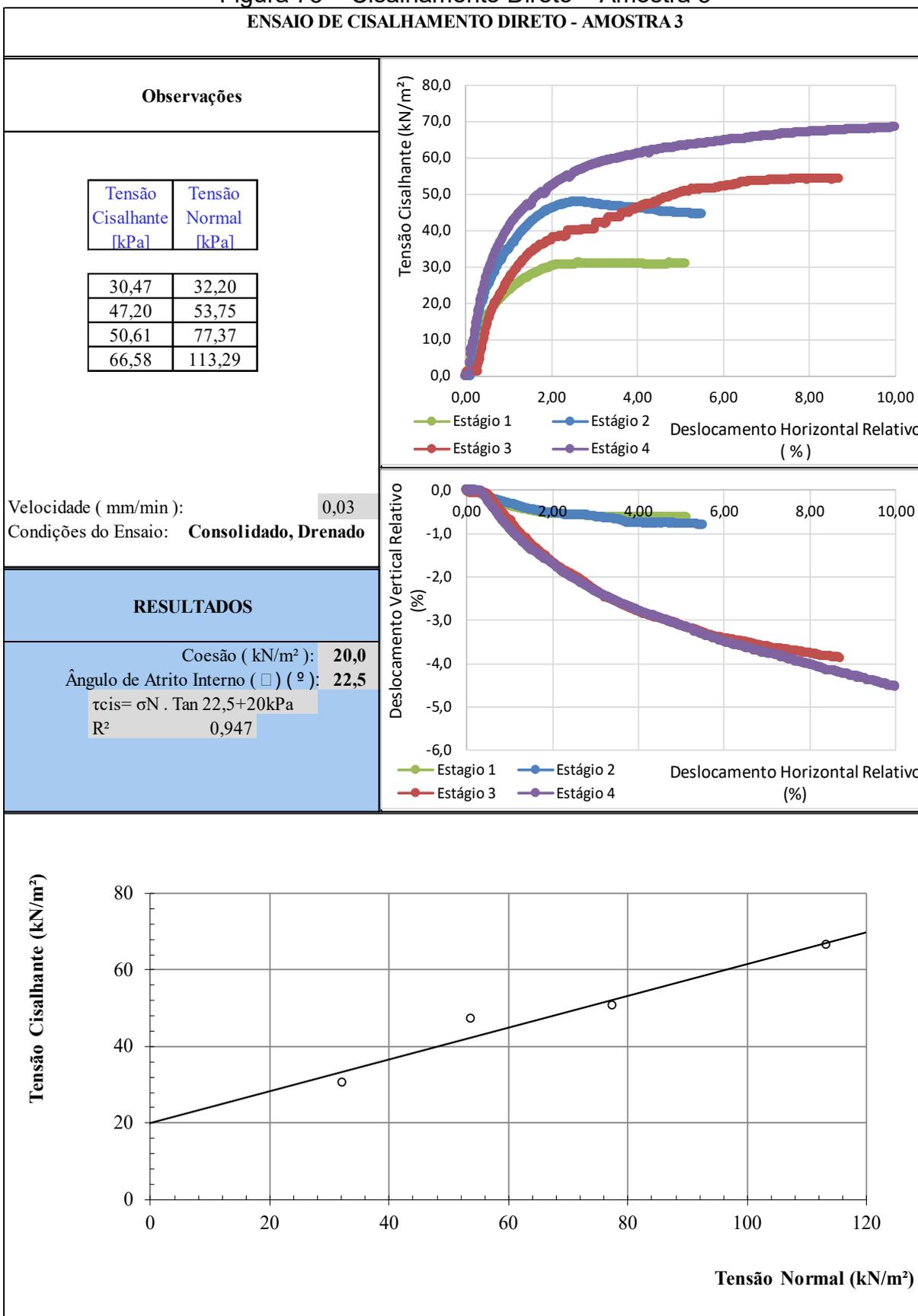
Fonte: Vitor Muller

Figura 74 – Cisalhamento Direto – Amostra 2



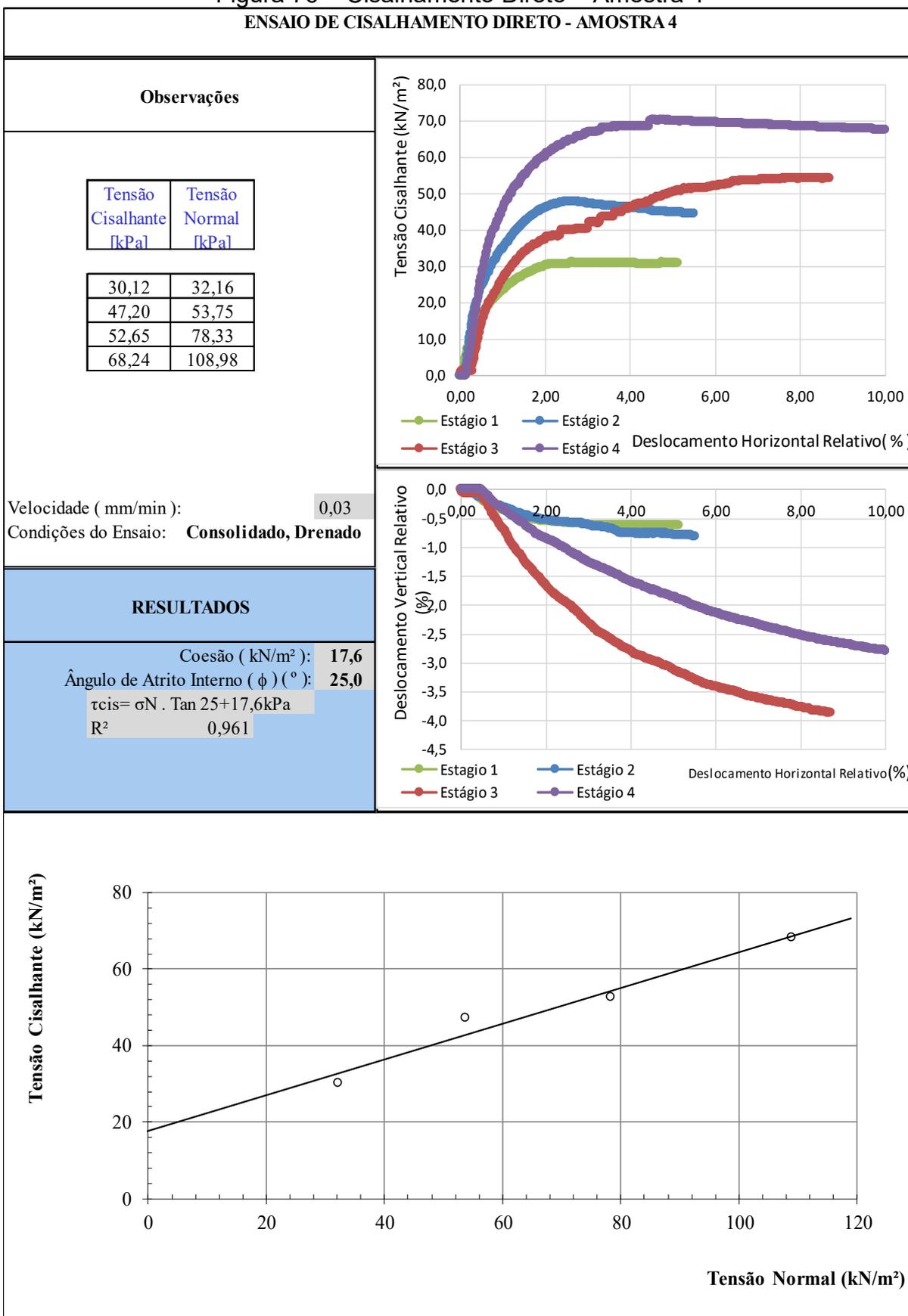
Fonte: Vitor Muller

Figura 75 – Cisalhamento Direto – Amostra 3



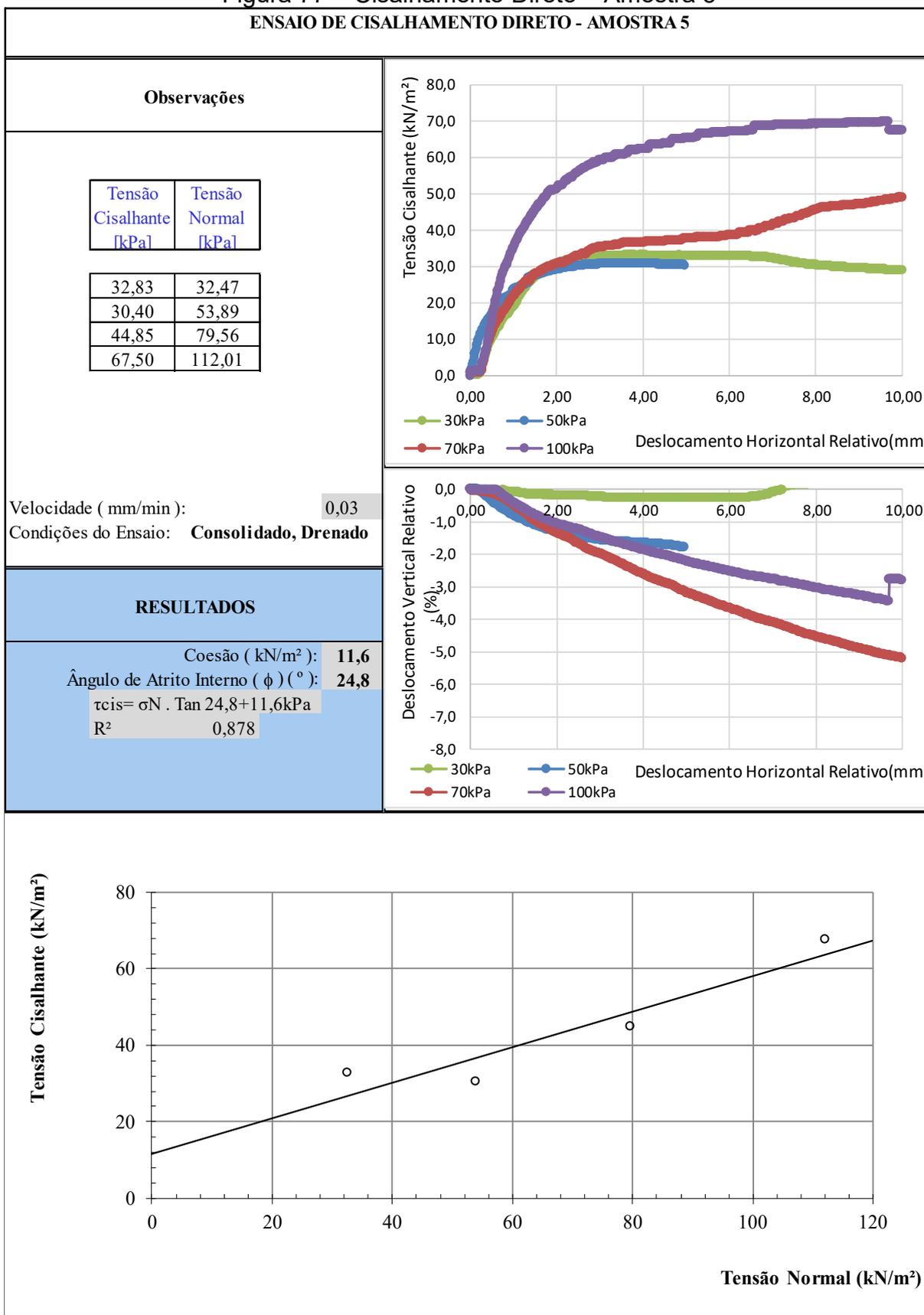
Fonte: Vitor Muller

Figura 76 – Cisalhamento Direto – Amostra 4



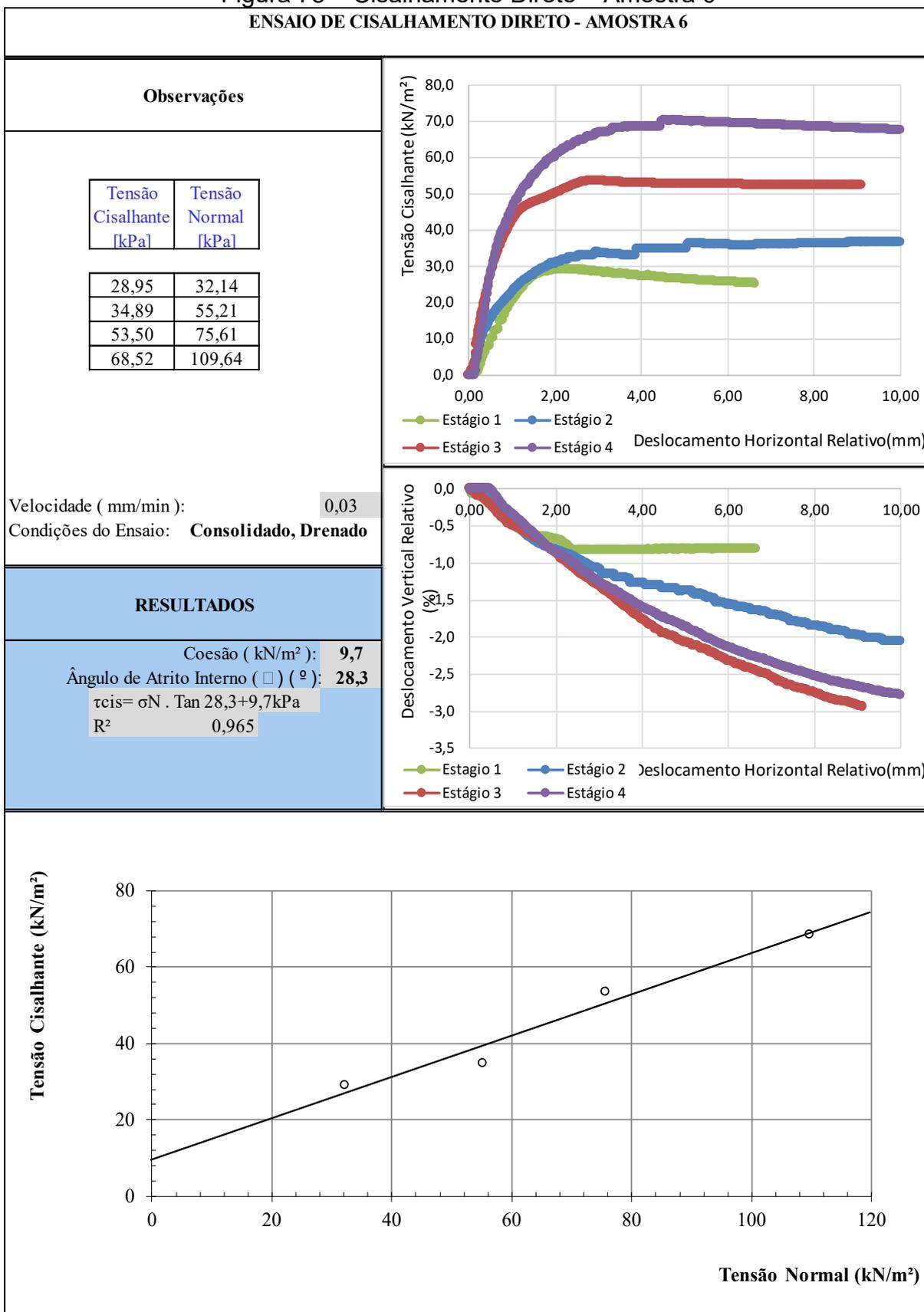
Fonte: Vitor Muller

Figura 77 – Cisalhamento Direto – Amostra 5



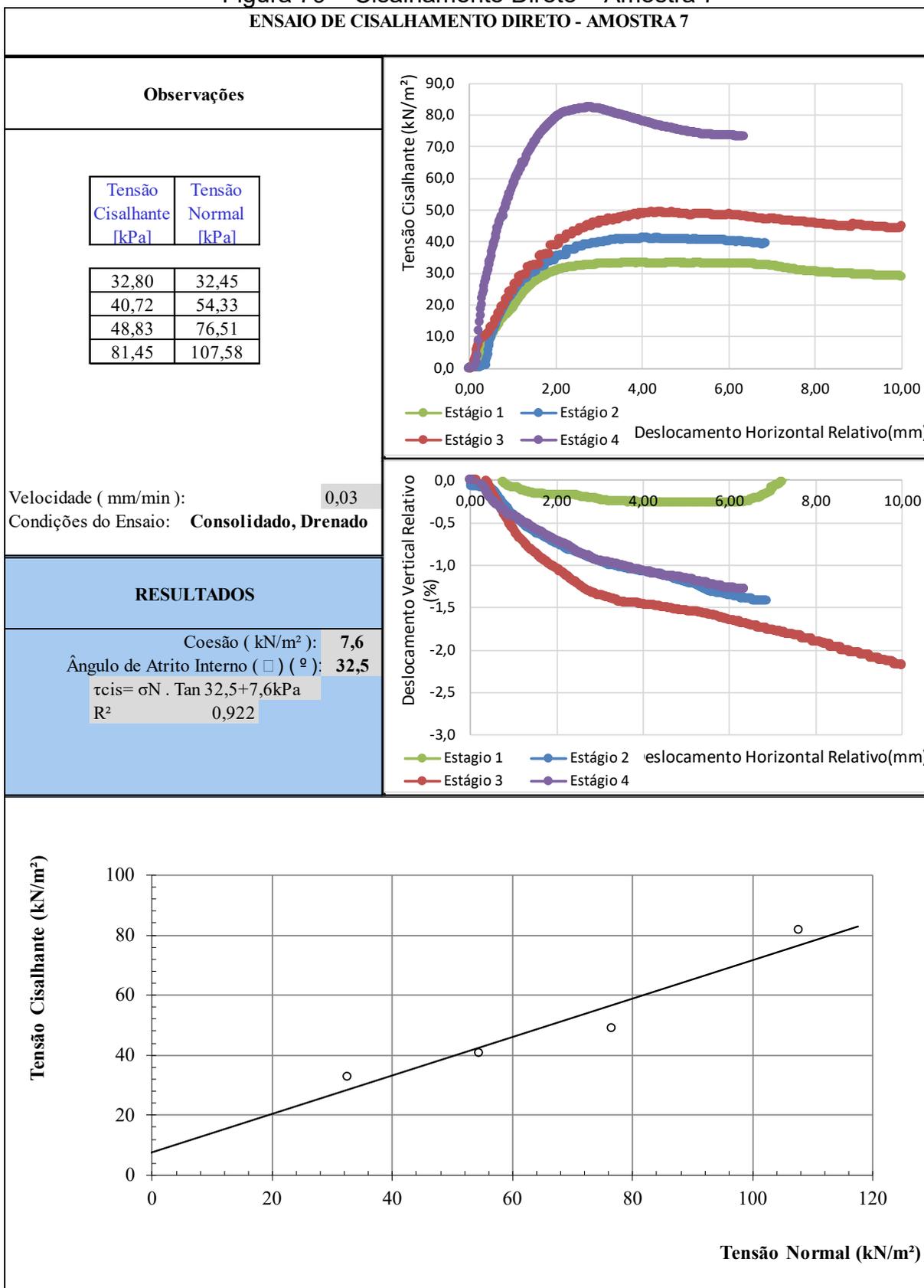
Fonte: Vitor Muller

Figura 78 – Cisalhamento Direto – Amostra 6



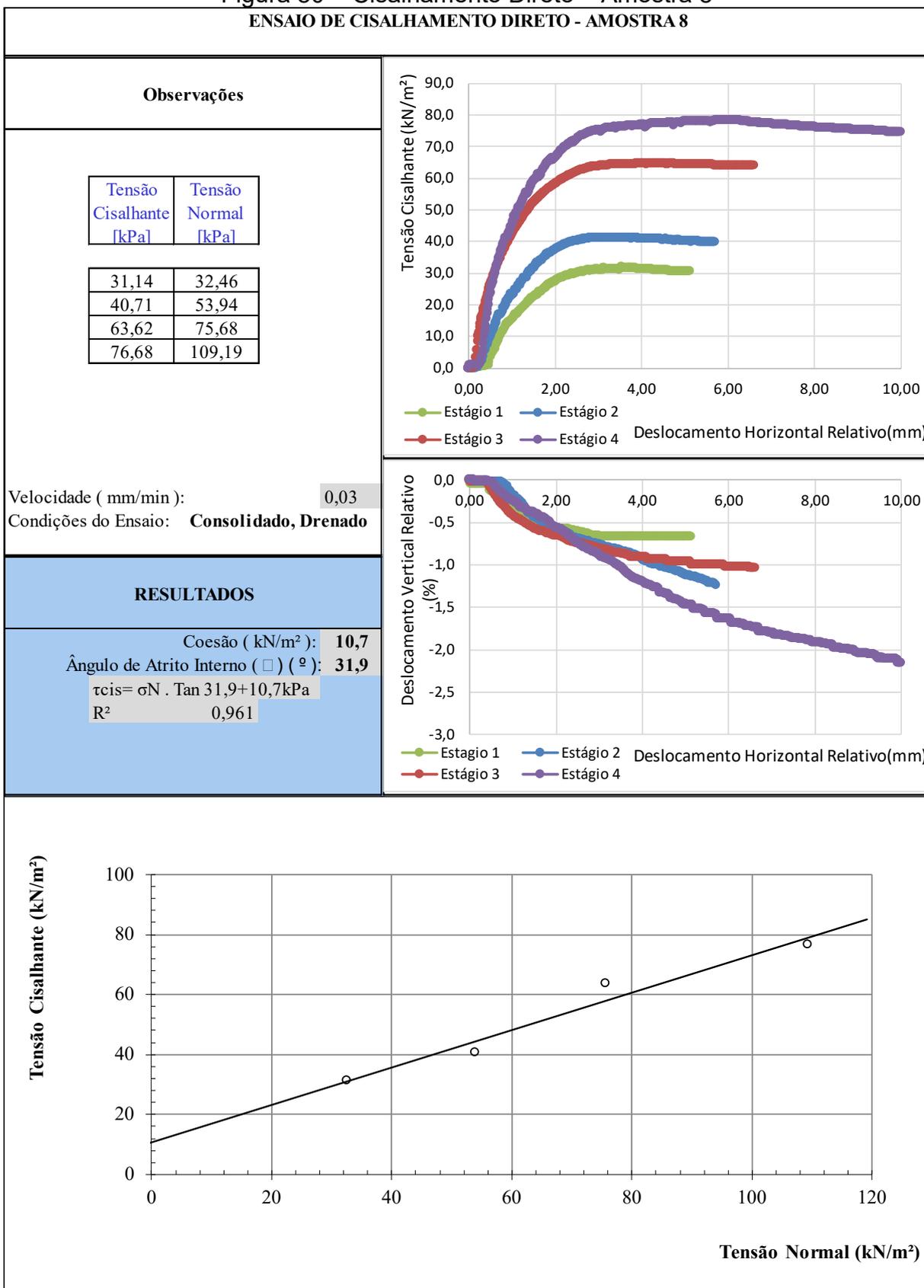
Fonte: Vitor Muller

Figura 79 – Cisalhamento Direto – Amostra 7



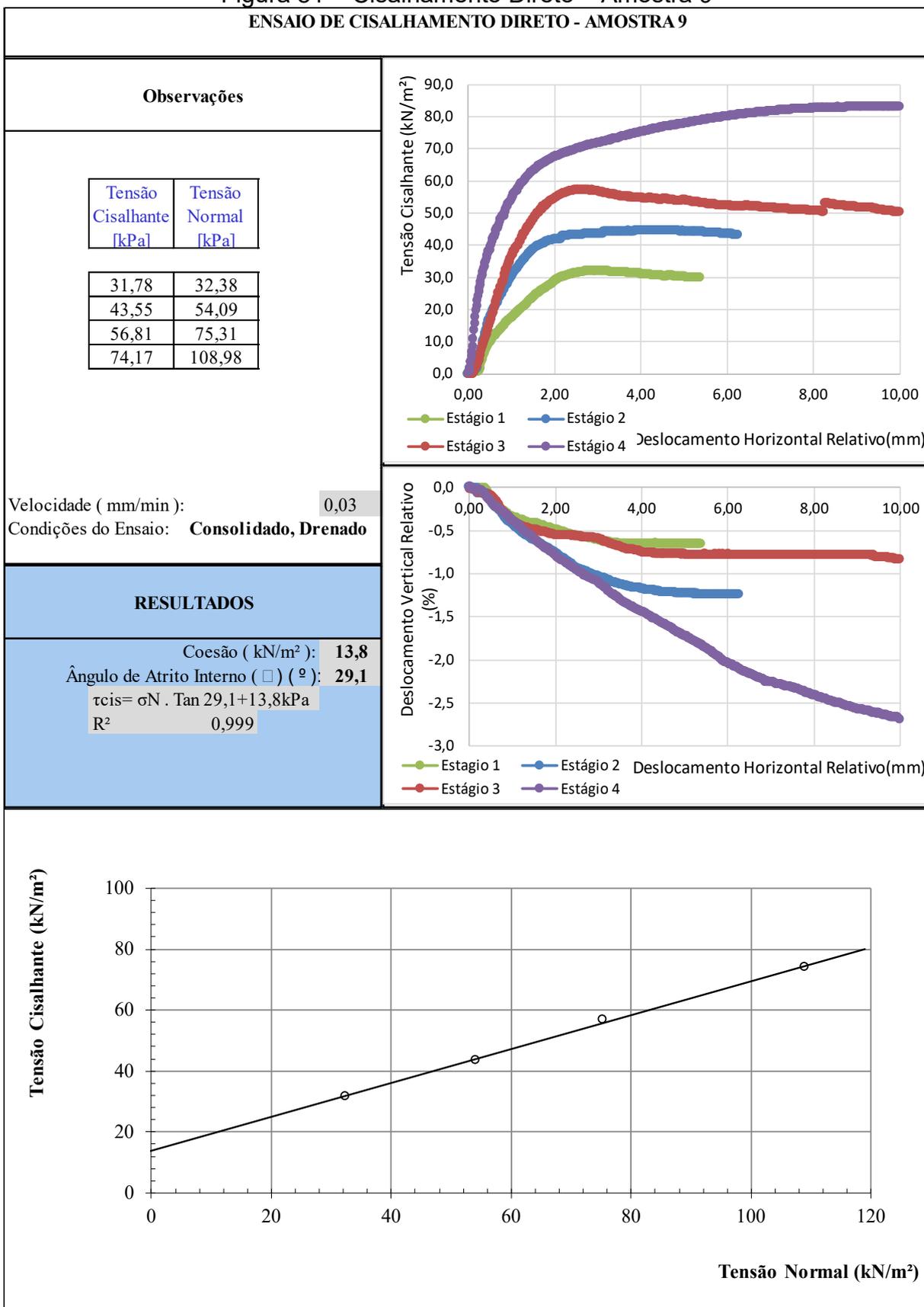
Fonte: Vitor Muller

Figura 80 – Cisalhamento Direto – Amostra 8



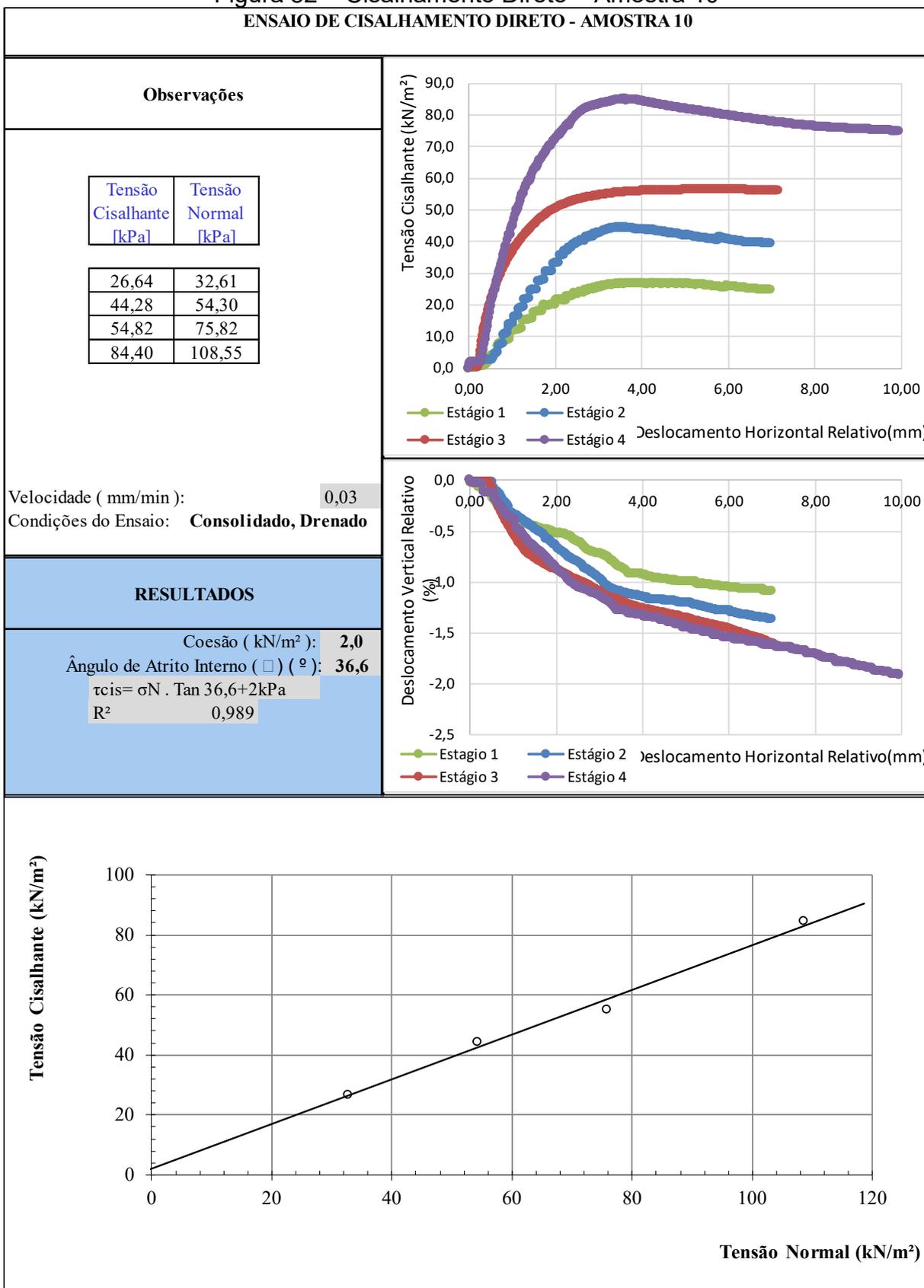
Fonte: Vitor Muller

Figura 81 – Cisalhamento Direto – Amostra 9



Fonte: Vitor Muller

Figura 82 – Cisalhamento Direto – Amostra 10



Fonte: Vitor Muller